

DIVONZIL GONÇALVES CORDEIRO

**LIMITES E ÍNDICES DE CONSISTÊNCIA DE
LATOSSOLOS ROXO
DO ESTADO DO PARANÁ**

**Dissertação apresentada ao Curso
de Pós-Graduação em Agronomia,
área de concentração em Ciência
do Solo, do Setor de Ciências
Agrárias da Universidade Federal
do Paraná, como requisito parcial
à obtenção do grau de mestre.**

Curitiba

1991



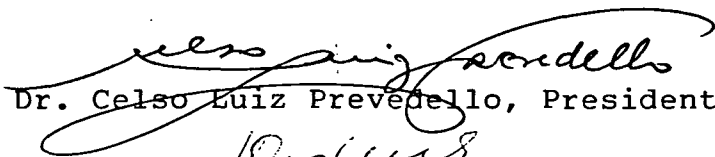
MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

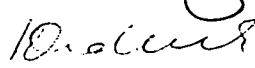
SETOR DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA-ÁREA DE CONCENTRAÇÃO
"CIÊNCIA DO SOLO"


P A R E C E R

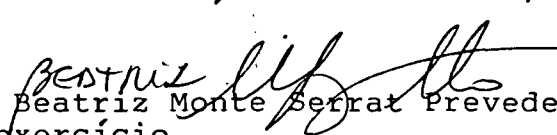
Os Membros da Comissão Examinadora, designada pela Coordenadora do Curso de Pós-Graduação em Agronomia-Área de Concentração "Ciência do Solo" (ad-referendum), para realizar a arguição da Dissertação de Mestrado, apresentada pelo candidato DIVONZII GONÇALVES CORDEIRO com o título: "LIMITES E ÍNDICES DE CONSISTÊNCIA DE LATOSSOLOS ROXO DO ESTADO DO PARANÁ", para obtenção do grau de Mestre em Agronomia-Área de Concentração "Ciência do Solo" do Setor de Ciências Agrárias da Universidade Federal do Paraná, após haver analisado o referido trabalho e arguido o candidato, são de parecer pela "APROVAÇÃO" da Dissertação, com conceito "A", completando assim, os requisitos necessários para receber o diploma de Mestre em Agronomia-Área de Concentração "Ciência do Solo".

Secretaria do Curso de Pós-Graduação em Agronomia-Área de Concentração "Ciência do Solo", em Curitiba, 13 de novembro de 1991.


Prof. Dr. Celso Luiz Prevedello, Presidente.


Engº Agrº Dr. Renato Antonio Dedecek, 1º Examinador.


Prof. Dr. Marcos Luiz de Paula Souza, 2º Examinador.


Profª Drª Beatriz Monte Serrat Prevedello, Coordenadora em exercício.

AGRADECIMENTOS

A Deus pela força que nos deu para chegarmos ao final de mais esta etapa.

Ao Prof. Dr. Celso Luiz Prevedello, orientador e amigo que não nos faltou em nenhum momento,

Aos professores do Curso de Pós-Graduação em Ciência do Solo pela amizade e ensinamentos,

Aos funcionários do Curso de Pós-Graduação em Ciência do Solo, em especial ao secretário Gerson Nowick,

Aos funcionários dos laboratórios de física e química do Departamento de Solos, em especial ao amigo Rui Barbosa da Silva,

Ao Departamento de Estradas e Rodagem do Paraná (DER-Pr), em cujo laboratório de solos da Divisão de Pesquisa e Desenvolvimento foram desenvolvidos ensaios fundamentais para este trabalho,

Aos funcionários da Divisão de Pesquisa e Desenvolvimento do DER-Pr, especialmente a José Pesuchi Junior, quem nos recebeu, e à equipe do laboratório de física de solos,

Às funcionárias da Biblioteca do Setor de Ciências Agrárias da UFPr pela colaboração,

À Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA), que nos deu a oportunidade para este aperfeiçoamento,

Aos colegas do curso de Pós-Graduação, especialmente ao
amigo Miguel Ken Moriya pelo apoio,

À minha esposa e filhos, pelo carinho e paciência,
suportando comigo momentos bastante difíceis,

À minha mãe pelas orações, irmãos e cunhados pelo apoio
e estímulo,

À todos os amigos que nos auxiliaram e incentivaram
durante a realização deste trabalho.

SUMÁRIO

1.	<u>INTRODUÇÃO</u>	1
2.	<u>REVISÃO DE LITERATURA</u>	3
2.1.	ESTADOS E LIMITES DE CONSISTÊNCIA DO SOLO.....	3
2.2.	MÉTODOS DE DETERMINAÇÃO DOS LIMITES DE CONSISTÊNCIA DO SOLO.....	6
2.2.1.	Métodos de determinação do limite de liquidez (LL), ou limite superior de plasticidade.....	6
2.2.1.1.	Método de Casagrande (1932).....	7
2.2.1.2.	Método de Bakhtin, citado por Revut e Rode (1981).....	8
2.2.1.3.	Método de Okhotin, citado por Revut e Rode (1981).....	9
2.2.1.4.	Método de Vasil'ev, citado por Revut e Rode (1981).....	9
2.2.1.5.	Método de Campbell (1975).....	10
2.2.2.	Método de determinação do limite de plasticidade (LP), ou limite inferior de plasticidade.....	11
2.2.2.1.	Método de Casagrande (1932).....	11
2.2.2.2.	Método de Fedorov, citado por Revut e Rode (1981).....	12
2.2.2.3.	Método de Boichenko e Goldstein, citados por Revut e Rode (1981)...	12
2.2.2.4.	Método de Campbell (1976).....	13

2.2.3.	Métodos de determinação dos limites de friabilidade do solo.....	13
2.2.3.1.	Método de Vilenskii, citado por Revut e Rode (1981).....	14
2.2.3.2.	Método de Kachinskii, citado por Revut e Rode (1981).....	15
2.2.3.3.	Método de Ryzhov, citado por Revut e Rode (1981).....	15
2.2.3.4.	Método de Godlin, citado por Revut e Rode (1981).....	16
2.2.3.5.	Método de Lima (1970).....	16
2.2.3.6.	Método de Utomo e Dexter (1981)...	18
2.3.	CONSIDERAÇÕES ADICIONAIS SOBRE OS MÉTODOS DE DETERMINAÇÃO DOS LIMITES DE CONSISTÊNCIA.....	20
3.	<u>MATERIAL E MÉTODOS</u>	30
3.1.	SOLOS.....	30
3.2.	LOCALIZAÇÃO E USO DOS SOLOS.....	31
3.3.	COLETA E PREPARO DAS AMOSTRAS.....	32
3.4.	ANÁLISES QUÍMICA E GRANULOMÉTRICA.....	33
3.5.	DETERMINAÇÕES DOS LIMITES E ÍNDICES DE PLASTICIDADE.....	35
3.6.	DETERMINAÇÕES DOS LIMITES E ÍNDICES DE FRIABILIDADE.....	35
4.	<u>RESULTADOS E DISCUSSÃO</u>	37
5.	<u>CONCLUSÃO</u>	67
6.	<u>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</u>	69
7.	<u>ANEXOS I</u>	73
8.	<u>ANEXOS II</u>	85

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

1.	Aparelho de Casagrande. Aparelho (1); estilete (2); base de ebonite (3); concha (4).....	7
2.	Variação esquemática da densidade do solo úmido em função da umidade gravimétrica, mostrando os limites e índices de friabilidade (LIMA, 1970) e de plasticidade (BAVER et al. 1972). A linha descontínua é apenas uma suposta indicação.....	23
3.	Relação entre a densidade úmida e umidade gravimétrica das camadas de 0 a 15 e 15 a 30cm do solo LIM.....	38
4.	Relação entre a densidade úmida e umidade gravimétrica das camadas de 0 a 15 e 15 a 30cm do solo LCE.....	39
5.	Relação entre a densidade úmida e umidade gravimétrica das camadas de 0 a 15 e 15 a 30cm do solo MAR.....	40
6.	Relação entre a densidade úmida e umidade gravimétrica das camadas de 0 a 15 e 15 a 30cm do solo CMO.....	41
7.	Relação entre a densidade úmida e umidade gravimétrica das camadas de 0 a 15 e 15 a 30cm do solo LAR.....	42
8.	Relação entre a densidade úmida e umidade gravimétrica das camadas de 0 a 15 e 15 a 30cm do solo LIE.....	43
9.	Relação entre a densidade úmida e umidade gravimétrica das camadas de 0 a 15 e 15 a 30cm do solo FOI.....	44
10.	Relação entre a densidade úmida e umidade gravimétrica das camadas de	

	0 a 15 e 15 a 30cm do solo CMB.....	45
11.	Relação entre a densidade úmida e umidade gravimétrica das camadas de 0 a 15 e 15 a 30cm do solo TOL.....	46
12.	Relação entre a densidade úmida e umidade gravimétrica das camadas de 0 a 15 e 15 a 30cm do solo JUR.....	47
13.	Relação entre a densidade úmida e umidade gravimétrica das camadas de 0 a 15 e 15 a 30cm do solo UBI.....	48
14.	Valôres experimentais da densidade úmida em função da umidade gravimétrica, dentro dos intervalos médios de consistência seca, friável e plástica das camadas de 0 a 15 e 15 a 30cm dos onze LATOSSOLOS ROXO.....	51
15.	Relação entre o índice de plasticidade e limite de liquidez. A linha "A" representa a divisão de Casagrande entre argilas inorgânicas (acima da linha) e argilas orgânicas (abaixo). As linhas pontilhadas referem-se aos solos havaianos de natureza predominantemente caulinitica ou oxídica, obtidos por Sato, citado por EL-SWAIFY (1980). Os pontos experimentais e a linha cheia referem-se aos LATOSSOLOS ROXO (Pr).....	60

RESUMO

Foram estudados os limites e índices de friabilidade e de plasticidade nas profundidades de 0 a 15 e 15 a 30cm de onze unidades taxonômicas da classe de LATOSSOLOS ROXO do Estado do Paraná. Os limites e índice de friabilidade foram determinados segundo LIMA (1970), a partir das curvas que relacionam a densidade do solo úmido em função da umidade gravimétrica; os limites e índice de plasticidade foram determinados segundo CASAGRANDE (1932). Também foram determinadas, para cada camada de solo, as porcentagens de carbono, argila, silte e areia, bem como as porcentagens de umidades gravimétricas na saturação. Os resultados permitiram concluir que: (i) o estado médio de consistência friável foi relativamente pequeno (20%) diante da magnitude ocupada pelo conjunto dos demais estados (seco, plástico e fluído), que foi de 80%; (ii) tanto o limite de friabilidade máximo obtido segundo Lima (1970), como o limite de plasticidade determinado segundo CASAGRANDE (1932), foram capazes de identificar a umidade de mudança entre o estado friável e plástico, indistintamente; (iii) a regressão linear entre o índice de plasticidade e o limite de liquidez mostrou um coeficiente angular igual ao dos oxissóis havaianos, e um coeficiente linear que sugere uma composição mineralógica predominantemente caulinítica; (iv) dos efeitos quantitativos das frações orgânica e mineral, a primeira se mostrou importante em todos os limites e índices de consistência, enquanto que, da segunda, somente a argila. Além disso, a matéria orgânica apresentou igual efeito em ambos os estados friável e plástico, enquanto a argila foi 1,52 vezes mais efetiva no estabelecimento do estado plástico do que no friável; e (v) adicionalmente às porcentagens de carbono e argila, as frações silte e areia também se mostraram importantes na definição dos valores de máxima e mínima densidades do solo úmido.

ABSTRACT

Friability and plasticity limits and indexes were determined at 0 - 15 and 15 - 30cm depths in eleven Dusky RED LATOSSOLS from Paraná State. The friability limits and index were determined following Lima (1970), based on the curves that interrelate moist soil density and gravimetric moistures; the plasticity limits and index followed Casagrande (1932). It was also determined, for each soil depth, percentages of carbon, clay, silt and sand, and gravimetric moisture percentages at saturation. The results allowed to conclude that: (i) the medium stage of friable consistence was relatively small (20%) compared to the others stages (dry, plastic and viscous), that were of 80%; (ii) the maximum friability limit obtained following Lima (1970), and the plasticity limit determined following Casagrande (1932), were able to identify the moisture of change between the friable and plastic stages, indistinctively; (iii) the linear regression between plasticity index and liquid limit showed an angular coefficient equal to those of the hawaiian oxisols, and a linear coefficient that suggests a mineralogic composition dominated by caulinite; (iv) the soil organic fraction was important in all consistence limits and indexes, while clay was the only fraction important from the soil mineral. The organic matter showed equal effect in both friable and plastic stages, while the clay fraction was 1.52 times more effective in determining the plastic stage than in the friable one; and (v) besides the carbon and clay percentages, silt and sand fractions also showed to be important in defining the maximum and minimum values of moist soil density.

1 INTRODUÇÃO

Dentre os diversos métodos de trabalhos mecânicos do solo, todos compreendem distintos processos que atuam sobre ele, com o objetivo único de se desenvolver uma estrutura apropriada. Neste aspecto, é desejável que as condições de ruptura do solo sejam tais, que nem a puramente plástica e nem a completamente frágil ou quebradiça tenham lugar, mas sim que a consistência seja friável. Nessas condições se produzem muitos agregados de tamanho médio, distintos por completo dos torrões amassados como plástico ou com fragmentos finamente pulverizados, conferindo ao solo condições físicas satisfatórias ao crescimento e desenvolvimento das plantas.

O intervalo de umidade ótima para que se produza uma estrutura desejável (intervalo de friabilidade ou estado de sãção) é uma característica de cada solo, e são poucos os agricultores experientes que sabem reconhece-la, porquanto é função de uma série de fatores físicos e químicos.

Os objetivos deste trabalho foram:

(i) identificar os limites mínimo e máximo de friabilidade, definindo assim um o intervalo do estado médio de consistência friável das camadas de 0 a 15 e 15 a 30cm de onze unidades taxonômicas da classe LATOSSOLO ROXO, do Estado do Paraná, diante da magnitude ocupada pelo conjunto dos demais estados de

consistência (sêco, plástico e fluido);

(ii) identificar a correlação entre o limite de friabilidade máxima proposto por LIMA (1970), com o limite de plasticidade proposto por CASAGRANDE (1932), já que, por definição, ambos representam a umidade de mudança entre o estado friável e plástico;

(iii) estabelecer as indicações quantitativas dos efeitos das frações orgânica e mineral, representadas pelas porcentagens de carbono, argila, silte e areia, nos seguintes limites e índices de consistência: Limite de Friabilidade Mínima, Limite de Friabilidade Máxima, Índice de Friabilidade, Limite de Plasticidade, Limite de Liquidez e Índice de Plasticidade.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 ESTADOS E LIMITES DE CONSISTÊNCIA DO SOLO

À medida que a concentração de solo no sistema solo-água se torna suficiente para que a massa flua livremente, entram em ação as forças de coesão e adesão. Diz-se, então, que o solo apresenta uma certa "consistência".

Embora as propriedades mecânicas de um solo sejam determinadas em grande parte pela sua composição, a relação entre as fases sólida e líquida é decisiva em qualquer situação. Uma variação gradual nas propriedades mecânicas de um solo é devida aos constituintes sólidos (forma, tamanho das partículas e composição química dos minerais), enquanto que a transição de um estado para outro nos solos coesivos (contendo mais do que 35% de argila) é sempre acompanhada por uma variação no conteúdo de água (REVUT e RODE, 1981).

São distinguidas quatro formas (ou estados) de consistência nos solos (REVUT e RODE, 1981), quais sejam: sólida, semisólida, plástica e líquida.

Com baixos conteúdos de água, o solo é demasiadamente coeso pelo efeito cimentante entre as partículas secas. Nesse estado, se produzem grandes torrões quando o solo é arado (BAVER et al., 1972). KIEHL (1979), chama essa forma de consistência

sêca. Ao aumentar o conteúdo de água, as moléculas de água são adsorvidas sobre as partículas sólidas, debilitando a coesão e comunicando, segundo BAVER et al. (1972), friabilidade à massa de solo. Segundo esses autores, existe um intervalo de umidade em que são ótimas as condições para os trabalhos mecânicos do solo, cujo limite superior coincide com o limite de plasticidade, isto é, quando a coesão das películas de água ao redor das partículas sólidas promovem aglutinação do solo, iniciando-se o estado plástico. Como se nota, a zona de friabilidade referida por BAVER et al. (1972), coincide com a forma de consistência "semisólida", que se inicia com a debilidade das forças de coesão (início da friabilidade) e termina quando o solo inicia sinais de plasticidade. LIMA (1970), propôs um método, que será descrito adiante, para caracterizar as umidades inicial e final do intervalo de friabilidade, a partir da terra fina seca ao ar. ATTERBERG (1911), BAVER et al. (1972), consideram que a umidade sob a qual a contração do solo cessa (limite de contração) representa a umidade de mudança entre os estados seco ou (sólido) e friável (ou semisólido). Isso sugere que deve haver uma relação direta entre a umidade inicial do estado de friabilidade (LIMA, 1970), já que ambas as definições consideram essa umidade como a umidade de mudança entre os estados sólido e semisólido. Ao que parece, nenhum estudo foi feito ainda nesse sentido. Analogamente, e pelas mesmas razões, também deve ser esperada uma

relação direta entre a umidade final de friabilidade medida pelo método de LIMA (1970), com o limite de plasticidade (CASAGRANDE, 1932), que também será apresentado adiante.

Um solo se diz plástico quando a sua massa pode adquirir e conservar forma, mesmo depois de cessada a força que o deformou. As areias, por exemplo, embora possam ser moldadas, não conservam sua forma, por não serem plásticas. A umidade mínima do solo para que isso aconteça é a umidade de mudança entre a consistência friável e plástica, originalmente definida por ATTERBERG (1911,1912). Essa umidade, designada por LP (limite de plasticidade), segundo BAVER et al. (1972), é aquela onde o solo deixa de ser friável e inicia sua consistência plástica, porque a quantidade de água é suficiente para permitir uma orientação das partículas sólidas e o deslizamento entre elas. Essa situação permanece até quando as películas de água se tornam suficientemente espessas, de modo que a coesão entre elas diminui e a massa de solo se torna viscosa e flui. Nesse ponto, diz-se que o solo atingiu o seu limite superior de plasticidade, como originalmente foi definido por ATTERBERG (1911,1912), ou limite de liquidez (designado por LL), como mais modernamente é chamado (BAVER et al., 1972). O estado de consistência plástica, também designado por IP (índice de plasticidade= $LL-LP$) é, pois, uma medida indireta da força necessária para moldar o solo (BAVER et al., 1972).

Portanto, os limites de consistência do solo são: (i)

limite superior de plasticidade (ATTERBERG, 1911,1912) ou de liquidez (BAVER et al., 1972), que separa o estado líquido (ou viscoso) do estado plástico (ou magmático); (ii) limite inferior de plasticidade (ATTERBERG, 1911, 1912) ou limite de plasticidade (BAVER et al., 1972), que separa o estado plástico do estado friável (ou semisólido). Por razões conceituais, a umidade final de friabilidade ou friabilidade máxima (FMAX), segundo LIMA (1970), também separa o estado plástico do friável; e (iii) limite de contração, que separa o estado friável do seco. Como antes, a umidade inicial de friabilidade ou friabilidade mínima (FMIN), segundo LIMA (1970), também separa o estado friável do seco.

2.2 MÉTODOS DE DETERMINAÇÃO DOS LIMITES DE CONSISTÊNCIA DO SOLO

2.2.1 MÉTODOS DE DETERMINAÇÃO DO LIMITE DE LIQUIDEZ (LL), OU LIMITE SUPERIOR DE PLASTICIDADE.

A umidade no limite entre os estados plástico e líquido pode ser interpretada, também, como o limite de viscosidade. Esse limite permite julgar a umidade no qual o próprio peso da água supera as forças de hidratação e de coesão, ou mesmo, o ponto no qual essas forças começam a ser produzidas (REVUT e RODE, 1981).

2.2.1.1 Método de CASAGRANDE (1932)

O limite de liquidez é caracterizado pela umidade na qual um sulco de dimensões definidas e previamente feito no solo, através de um estilete especial, se fecha numa amplitude de 1 cm após 25 golpes. Este experimento é realizado com o auxílio do aparelho de CASAGRANDE, figura 1. O aparelho consta de uma concha de 92mm de diâmetro, que mecânica ou manualmente sofre golpes verticais com amplitude de 10mm sobre uma base fixa de ebonite.

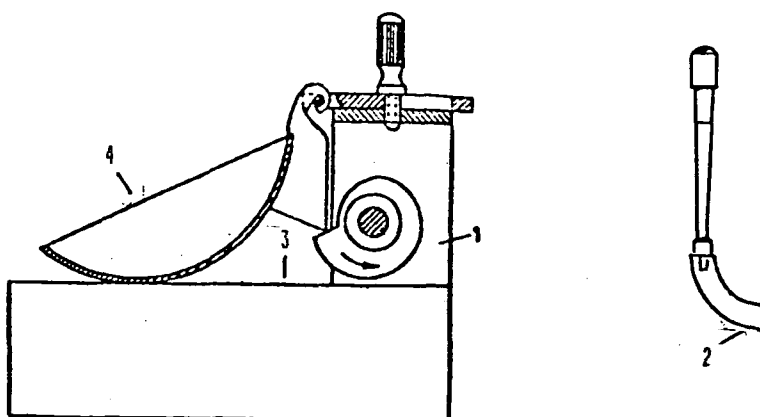


Figura 1. Aparelho de CASAGRANDE. Aparelho (1); estilete (2); base de ebonite (3); concha (4)

amostra de solo, previamente seca ao ar e passada por tamiz de

0,42mm, é misturada com água, e 50 gramas desse material é colocado na concha, de modo a formar uma espessura de 12mm (na parte central da concha). A superfície é cuidadosamente alisada, e um sulco, perpendicularmente à massa de terra, é feito em toda a sua extensão por meio do estilete especial.

A concha no aparelho sofre os golpes verticais na razão de duas revoluções por segundo, até que a superfície dos dois segmentos de solo, divididos pelo sulco, se fundem numa amplitude de 1cm. Nesse estágio, a umidade do solo é determinada. Se o número de impactos necessários para fusão excede a 25, então a umidade é aumentada (ou diminuída em caso contrário) e o experimento é repetido. Após três ou quatro repetições com diferentes umidades, constrói-se um gráfico desses valores em função dos logaritmos dos seus respectivos números de impactos. O ajuste desses pontos é realizado por meio de uma reta, pela qual se interpola o valor da umidade correspondente aos 25 impactos. Esse valor, expresso em porcentagem, corresponde ao limite de liquidez.

2.2.1.2 Método de BAKHTIN, citado por REVUT E RODE (1981)

Nesse método, a amostra de solo previamente seca ao ar é passada em tamiz de 1mm e colocada sobre um prato de metal de

12cm de diâmetro. A amostra é cuidadosamente misturada com água destilada até a formação de uma consistência pastosa. A amostra é então conservada assim numa câmara úmida, e após 24 horas ela é

revolvida e alisada para formar uma camada de 1cm. Por meio de um estilete a amostra é então dividida em duas partes, sendo que o estilete deve possuir 2mm na base e 12mm na superfície, e 1cm de altura. Após isso, o prato deverá cair por três vezes de uma altura de 6cm. Se no terceiro impacto ambas as partes de solo se aproximam por 1mm numa extensão de 1,5 a 2,0cm de comprimento, então o limite de liquidez é determinado tomando-se 10 a 15 gramas da amostra do solo para determinação da umidade. Se após a terceira queda o solo se encontra demasiadamente úmido ou seco, o experimento é repetido.

2.2.1.3 Método de OKHOTIN, citado por REVUT E RODE (1981)

Este método difere do anterior pelo fato de que a largura do estilete na base deve ser de 5mm. Além disso, o limite de liquidez é encontrado quando na terceira queda livre do prato de uma altura de 40cm, ambas as partes de juntam.

2.2.1.4 Método de VASIL'EV, citado por REVUT E RODE (1981)

Neste método, o limite de liquidez é determinado

através de um cone de aço com 76 gramas de massa, 25mm de altura e ângulo de 30 graus. Na distância de 10mm do ápice do cone existe uma marca circular. O Instrumento consiste de um arame de aço curvado numa forma semicircular, tendo duas esferas metálicas de 19mm; o arame é fixo na base do cone como um balanceiro.

Para a determinação, a pasta de solo, como descrita no item 2.2.1.2, é colocada num copo de alumínio com 2cm de altura e 4cm de diâmetro, e sua superfície é alisada. O cone é levemente polido com vaselina e delicadamente colocado sobre a superfície do solo, passando a penetrá-lo pela ação de seu peso. Se ele penetra 10mm na pasta, a umidade da amostra corresponderá ao limite de liquidez. Se o cone ultrapassar o limite dos 10mm, o solo estará demasiadamente úmido (ou seco, em caso contrário).

2.2.1.5 Método de CAMPBELL (1975)

CAMPBELL (1975), desenvolveu um método para a determinação do limite de liquidez e de plasticidade (este último será discutido adiante), com base no trabalho de TOWNER (1973), que se utilizou de um cone de queda livre para determinar a resistência ao corte dos solos agrícolas, todavia sem sugerir que o cone pudesse ser utilizado na obtenção desse limite.

O penetrômetro de queda livre é parte de um aparelho usado em testes de betume, encontrado facilmente no comércio.

Para a determinação do limite de liquidez, um cone de 30 graus e massa de 80 gramas é deixado penetrar livremente por 5 segundos no solo previamente preparado como no item 2.2.1.1, mas contido em copo metálico rígido com 55mm de diâmetro e 40mm de altura. A profundidade de penetração do cone no solo é medida, após aquele período de tempo, com o auxílio de um relógio medidor, com precisão de 0,1mm. Segundo CAMPBELL (1975), o limite de liquidez é a umidade, expressa em percentagem, quando o penetrômetro alcança a profundidade de 20mm no solo.

2.2.2 MÉTODO DE DETERMINAÇÃO DO LIMITE DE PLASTICIDADE (LP) OU LIMITE INFERIOR DE PLASTICIDADE.

A umidade no limite entre os estados plástico e semisólido (ou friável) é definida, segundo ATTERBERG (1911, 1912), BAVER et al. (1972) e outros, pelo limite de plasticidade. De acordo com LIMA (1970), o limite de friabilidade máxima também define essa umidade de mudança entre aqueles estados. Esse limite permite julgar a umidade na qual o solo perde coesão sob a ação de uma força, ou mesmo, o ponto no qual a coesão é produzida (REVUT e RODE, 1981).

2.2.2.1 Método de CASAGRANDE (1932)

O limite de plasticidade é caracterizado pela umidade

na qual uma porção de solo é rolada com as mãos sobre uma placa de vidro, até que se forme um bastão de 3 a 4mm de diâmetro, que se rompe em partes de 6 a 10mm de comprimento. Segundo BAVER et al. (1972), ainda que esse método possa parecer grosseiro, é possível a reprodutibilidade entre repetições, com notável precisão.

2.2.2.2 Método de FEDOROV, citado por REVUT E RODE (1981)

Este método utiliza o penetrômetro descrito brevemente no item 2.2.1.4. Na superfície do solo contido num copo metálico de 3cm de altura e 5cm de diâmetro, o cone é deixado cair livremente de uma altura de 34cm. O limite de plasticidade é caracterizado pela umidade, expressa em porcentagem, na qual o cone penetra a uma profundidade de 10mm. Do contrário, o solo deve perder ou ganhar água, e o teste é repetido, até que a penetração de 10mm seja atingida.

2.2.2.3 Método de BOICHENKO e GOLDSTEIN, citados por REVUT e RODE (1981).

Neste método, a amostra é colocada num cilindro de latão e vazada sobre um prato de vidro plano. Um segundo prato é então colocado sobre a amostra e uma carga de 2Kg é apoiada nele.

O diâmetro do disco de solo, por isso formado, é em seguida medido. Amostras de mesmo solo mas com diferentes umidades são repetidas e os resultados apresentados num gráfico relacionando as umidades gravimétricas (expressas em porcentagem), em função dos respectivos diâmetros de discos, o ponto de inflexão na curva representa a umidade crítica, que corresponde ao limite de plasticidade do solo.

2.2.2.4 Método de CAMPBELL (1976)

Este método utiliza o mesmo aparelho e penetrômetro descritos no item 2.2.1.5.

O método consiste essencialmente em se conhecer a profundidade de penetração do cone no solo com diferentes umidades. A posição inicial do ápice do cone, no tempo zero, deve ser coincidente com a superfície do solo contido nos anéis rígidos, já descritos. Por esse método, a umidade correspondente ao mínimo na curva de penetração em função da umidade gravimétrica, define o limite de plasticidade.

2.2.3 MÉTODOS DE DETERMINAÇÃO DOS LIMITES DE FRIABILIDADE DO SOLO.

A friabilidade do solo mede as condições nas quais o solo, sob a ação de implementos agrícolas, é desarranjado em

agregados de 0,5 a 10mm de diâmetro. Nesse estado de consistência, o solo apresenta uma baixa resistência específica ao cultivo e uma favorável relação entre as fases sólida, líquida e gasosa (REVUT e RODE, 1981). Segundo COLLIS-GEORGE et al. (1971), o trabalho mínimo que é necessário para realizar o trabalho de cultivo é dado por:

" Trabalho mínimo = força de ruptura x volume do solo cultivado"

O conceito de trabalho específico surge dessa equação e se define como o trabalho requerido para cultivar a unidade de volume de solo.

2.2.3.1 Método de VILENSKII, citado por REVUT e RODE (1981)

Neste método, as amostras de TFSA são passadas em tamiz de 0,25mm, e colocadas em porções de 50 e 100 gramas em pratos de porcelana. A seguir, é adicionado água em quantidades crescentes nos pratos. Após a adição de água, os conteúdos de cada prato são misturados com o auxílio de uma espátula, preferencialmente coberta por uma lâmina de borracha. Na mistura será verificada a formação de agregados. Verificada a condição de máxima formação de agregados em cada prato, a amostra é deixada secar ao ar, para depois passar por uma coluna formada por tamizes de diferentes diâmetros, de modo a permitir avaliar o peso total do número de agregados variando entre 0,25 e 10mm. A umidade ótima de

agregação é aquela que assegura a formação de um número máximo de agregados de 0,25 a 10mm quando misturados.

2.2.3.2 Método de KACHINSKII, citado por REVUT e RODE (1981).

A umidade relativa ótima para os trabalhos mecânicos na maioria dos solos, varia entre 60 e 70%, podendo ser encontrada, ainda, variações entre 50 a 80%. Entende-se por umidade relativa, neste método, a relação entre a umidade atual do solo pela sua porcentagem na saturação. Tem-se verificado para os solonetz russos, que a umidade ótima situa-se entre 50 e 60% da saturação.

2.2.3.3 Método de RYZHOV, citado por REVUT e RODE (1981).

Tem-se observado que o ótimo de friabilidade dos solos sierozem russos, correlaciona-se estreitamente com o limite de plasticidade determinado pelo método de CASAGRANDE (1932). Entende-se como ótimo de friabilidade, a umidade ótima para a formação de um número máximo de agregados, variando de tamanho entre 0,5 a 10mm. Para o tipo de solo mencionado anteriormente, por exemplo, a umidade ótima de agregação foi de 2 a 2,5% maior do que o limite de plasticidade determinado pelo método de CASAGRANDE (1932). O método de RYZHOV é uma extensão do método de

VILENSKII (ambos citados por REVUT e RODE, 1981), para condições de campo, bastando avaliar o peso dos diferentes tamanhos de agregados, a partir de amostras obtidas no campo sob diferentes umidades.

2.2.3.4 Método de GODLIN, citado por REVUT e RODE (1981).

Para a determinação do limite superior ótimo de formação de agregados, este método recomenda utilizar 30 a 50 gramas de agregados secos ao ar, umedecendo-os com água através de uma bureta. O solo e a água devem ser revolvidos com uma espátula até o momento em que ocorre a formação de agregados de 0,5 a 5mm, facilmente observados visualmente. Nesse momento, a determinação da umidade da amostra corresponde ao limite superior de umidade ótima para a formação de agregados.

GODLIN observou que o limite superior de umidade ótima para a formação de agregados é geralmente 1 a 2% inferior daquela correspondente ao limite de plasticidade determinado pelo método de CASAGRANDE (1932).

2.2.3.5 Método de LIMA (1970).

Neste método, ambos os limites de friabilidade, mínimo e máximo, são determinados. Para tanto, aproximadamente 2Kg. de TFSA passada em tamiz de 1mm são colocados numa betoneira. Essa

betoneira é semelhante às utilizadas para concreto, de forma cilíndrica e fechada numa das extremidades. Mede 35cm de diâmetro por 50cm de comprimento, com um rebordo cônico de 8cm na face aberta, e três pequenas pás fixas ao longo das paredes internas do tambor. Externamente, ela possui três cilindros com bolas de ferro no seu interior, as quais dão pancadas nesse tambor quando ele é girado (1rpm). Com a betoneira em movimento, junta-se cerca de 1% de água por meio de um pulverizador manual. Em seguida, remove-se o solo da betoneira passando-o por um tamiz de 4mm, recebendo o tamizado num recipiente de volume conhecido (é indicado um cubo de 10x10x10cm). Após remover o excesso de solo dos bordos desse recipiente, a densidade úmida da amostra é determinada, além da umidade gravimétrica a partir de uma sub amostra. Toda a massa de solo do recipiente é então retornada à betoneira para nova operação, mas com a adição de mais 1% (aproximadamente) de água. Sendo constante o volume do recipiente que recebe o solo peneirado, observa-se que a cada nova aplicação de água, o peso da amostra inicialmente cresce, passa por máximo, para depois decrescer (indicando a formação de agregados), passando por um mínimo, até um ponto que se notará um novo acréscimo. Quando se relacionam num gráfico os dados de densidade do solo úmido para cada respectivo valor de umidade, obtém-se uma curva inicialmente crescente até um ponto de inflexão. Segundo LIMA (1970), a umidade (expressa em porcentagem) nesse ponto,

caracteriza o limite inferior de friabilidade (FMIN). A partir desse primeiro ponto de inflexão, a densidade decresce com os progressivos aumentos de umidade até um segundo ponto de inflexão, sendo daí por diante novamente crescente. Segundo o mesmo autor, a umidade nesse segundo ponto de inflexão (também expressa em porcentagem), caracteriza o limite superior de friabilidade (FMAX).

Esse método foi originalmente proposto por KIEHL e CESAR (1963) para a determinação da umidade ótima de agregação. Mais tarde, ele foi aperfeiçoado por LIMA (1970), substituindo o termo umidade ótima de agregação por limite de friabilidade máxima, uma vez que os dois primeiros autores haviam demonstrado que a friabilidade máxima, assim determinada, coincidia com a umidade ótima de agregação. LIMA (1970), também propôs um índice de friabilidade (IF), dado por $IF = FMAX - FMIN$, representando o estado de sãção (friável), ou seja, a "faixa de umidade de um solo, em que ele pode ser trabalhado sem inconvenientes e sem prejuízo para as suas propriedades físicas". LIMA (1970), também observou que a FMAX assim determinada, correspondia conceitualmente ao limite de plasticidade de CASAGRANDE (1932), e interpretado por WEHR, citado por LIMA (1970), BAVER et al. (1972) e outros, como sendo "a umidade, acima da qual, o solo estaria em perigo de se tornar empastado pelo preparo do solo".

2.2.3.6 Método de UTOMO e DEXTER (1981).

Neste método, a friabilidade é medida através da equação $\ln S = -K \ln V + A$, onde S é a resistência tensil (KPa), V é o volume do agregado (m^3), A é a resistência tensil de uma amostra de solo com $1m^3$ de volume, e K é um parâmetro da medida de dispersão da resistência tensil das micro rupturas ou rachaduras e fendas dentro de torrões ou agregados. O valor de K é, portanto, um indicador de como os grandes torrões poderão se transformar em agregados menores. Segundo os autores, altos valores de K indicam que os grandes torrões têm uma menor resistência do que aqueles pequenos torrões ou agregados e podem, por isso, serem mais facilmente fragmentados em unidades menores bem mais fortes. Muitos pequenos valores de K , por outro lado, indicam que a resistência dos grandes torrões não difere muito daquela dos fragmentos menores. Nesses casos, quando a massa de solo é trabalhada no cultivo, ela poderá fragmentar-se em agregados e torrões de tamanhos variados. Os autores propõem, ainda, uma classificação arbitrária da magnitude de K , ou seja:

$K < 0,05$	solo não friável
$K \quad 0,05 - 0,10$	moderadamente friável
$K \quad 0,10 - 0,25$	friável
$K \quad 0,25 - 0,40$	muito friável
$K > 0,40$	solo mecanicamente instável

Esses valores podem ser comparados com o valor de $K=0$, o qual se aplica para a condição clássica de um material plástico ideal. Foi observado pelos autores, que as variações nos valores de K com a unidade se correlacionaram bem com os resultados experimentais.

2.3 CONSIDERAÇÕES ADICIONAIS SOBRE OS MÉTODOS DE DETERMINAÇÃO DOS LIMITES DE CONSISTÊNCIA.

A partir da definição de consistência como a resistência que um dado material oferece a uma deformação, muitos e diferentes métodos de determinação são conhecidos, além daqueles citados no item 2.2. BODMAN (1949), numa revisão sobre o assunto, reconheceu, já naquela época, a dificuldade de considerar todos os métodos disponíveis, a ponto de ter que classificá-los por grupos. De acordo com o tipo de deformação, aparelho utilizado e resistência medida, BODMAN (1949) classificou nove grupos de métodos. O que de importante se observa em sua revisão, é que nem todos os métodos ficam isentos de discussão, seja pela natureza empírica, pela forma e limitação da medida da resistência provocada pela deformação, pelas alterações na estrutura do solo antes das medições, etc. Com respeito aos métodos 2.2.1.1 e 2.2.2.1, por exemplo, BODMAN (1949) os classificou como de natureza empírica, com violenta perturbação de sua estrutura natural, todavia com valor para

propósitos comparativos, e de rápida execução. Tanto o limite de liquidez como de plasticidade, são considerados importantes na construção de auto-estradas, aeroportos e fundações de obras civis, para estimativa da capacidade de suporte dos solos sob carga. Do ponto de vista agrônômico, contudo, entre os dois limites, o de plasticidade ganha considerável importância, porquanto se trata da mudança entre o estado friável e plástico (BAVER et al., 1972). Nesse mesmo ponto de vista, maior importância ainda devem receber os limites de friabilidade, ou sejam, os limites mínimo e máximo de friabilidade. Nesse aspecto, a metodologia proposta por LIMA (1970), se mostra particularmente interessante, porque além dela promover a determinação de ambos os limites (e consequentemente definir o estado de sãção), os resultados são obtidos por pesagens, conferindo-lhe precisão (KIEHL, 1979), não dependendo da habilidade do operador. Além disso, desde que, por definição, a F_{MAX} e LP são valores comuns, e desde que a determinação do LP sofre limitações diversas (BODMAN, 1949; SHERWOOD e RYLEY, 1970; CAMPBELL, 1976), faz-se necessário proceder a uma análise mais profunda sobre a determinação de ambas.

Embora todos os ajustes dos pontos experimentais obtidos por LIMA (1970), ao relacionar a densidade do solo úmido em função da umidade gravimétrica, tenham apresentado comportamento semelhante, isto é, a forma de uma senóide mais ou

menos alongada, nenhuma explicação desse comportamento é conhecida em detalhes. Algumas prováveis interpretações isoladas desse comportamento, são como segue, baseadas em BAVER et al. (1972), LIMA (1970) e KIEHL (1979).

Como se observa no esquema de figura 2, a linha cheia apresenta dois pontos de inflexão: um correspondente ao máximo e outro ao mínimo da densidade do solo úmido. Segundo propõe LIMA (1970), os valores de umidade correspondentes aos valores de máxima e mínima densidade, são chamados de friabilidade mínima (FMIN) e máxima (FMAX), respectivamente. A friabilidade mínima, segundo esse autor, representa o início do estado de sasão do solo. Este ponto acha-se representado na figura 2 por FMIN. A friabilidade máxima, em contrapartida, representa, segundo o mesmo autor, o final do estado de sasão do solo, isto é, o limite superior de umidade no qual o solo pode ser trabalhado sem prejuízo de suas propriedades físicas. Este ponto acha-se representado na figura 2 por FMAX. O estado de sasão, ou índice de friabilidade (IF) é, pois, o intervalo de umidade do solo em que se apresenta o melhor estado de agregação para o cultivo. Esta definição coincide com a de BAVER et al. (1972), que afirmam que neste estado os agregados são soltos e a coesão é mínima, não existindo água suficiente para a formação de películas nos contatos entre as partículas para produzir a coesão característica do estado plástico. No estado friável, BAVER et al. (1972), presumem que os agregados se mantêm unidos, em parte

pelo menos, pela orientação das moléculas de água entre as partículas individuais e os cátions trocáveis. Tal sistema de enlaces está composto por partículas unidas a moléculas de água orientadas até os cátions trocáveis, unidas a moléculas de água orientadas até as partículas (RUSSEL, 1934). Analogamente ao que será discutido para o índice de plasticidade, o índice de friabilidade pode ser interpretado como uma medida indireta da menor resistência específica ao cultivo. É função do número de filmes de água que envolvem as partículas sólidas, e representa a

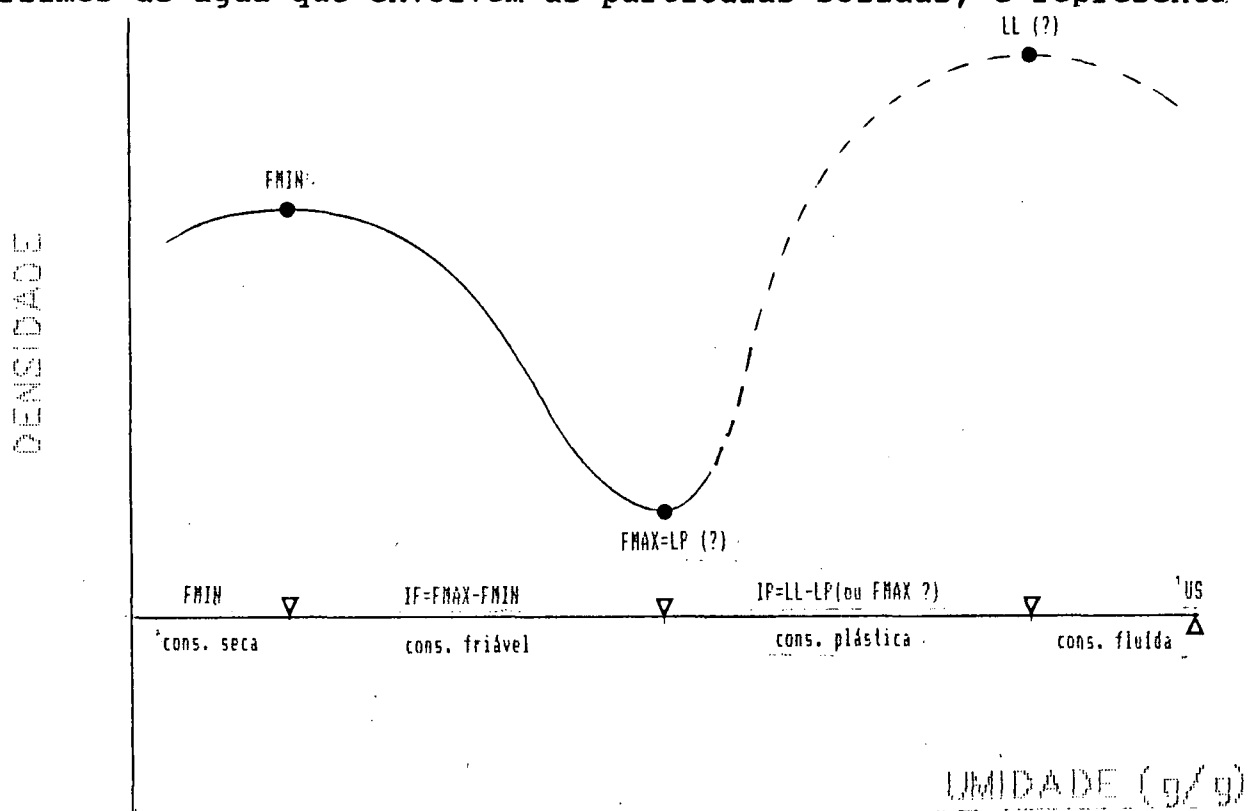


Figura 2. Variação esquemática da densidade do solo úmido em função da umidade gravimétrica, mostrando os limites e índices de friabilidade (LIMA, 1970) e de plasticidade (BAVER et al. 1972). A linha descontínua é apenas uma suposta indicação.

quantidade de água que se deve adicionar ao solo para aumentar a espessura de películas na qual ocorre a máxima densidade do solo úmido, até a espessura em que se produz a mínima densidade. Isto significa que deve existir uma relação direta entre IF e FMAX. Segundo BAVER et al. (1972), o limite de plasticidade do solo é a umidade de mudança da consistência friável e plástica. Como já observado antes, isto sugere que o limite máximo de friabilidade (FMAX) seja coincidente com o limite de plasticidade (representado na figura 2 por LP); pois, segundo os próprios autores, é a partir desse ponto que os sucessivos incrementos de água no solo produzem um efeito de lubrificação entre as partículas sólidas, permitindo que elas deslizem e se orientem umas sobre as outras. Com isso, o efeito da lubrificação aumenta com a adição de água, causando um aumento na densidade do solo úmido até atingir, presumivelmente, um máximo, quando então as películas de água se tornam tão grandes que a coesão entre as partículas decresce e a massa de solo se torna progressivamente viscosa e fluida. No ponto em que a massa de solo aparenta sinais de fluidez, diz-se ter atingido a umidade correspondente ao limite de liquidez (BAVER et al., 1972).

O índice de plasticidade (IP) é, pois, uma medida indireta da força necessária para moldar o solo, sendo uma função do número de películas que revestem as partículas e representa a quantidade de água que se deve adicionar ao solo para aumentar a espessura na qual ele deixa de ser plástico para aquele onde se

inicia a fluidez, o que significa que deve existir uma relação direta entre o índice de plasticidade e o limite de liquidez (BAVER et al., 1972).

Portanto, pela análise exposta, pode-se concluir que a relação entre a densidade do solo úmido em função do aumento gradativo de umidade, a partir do solo previamente peneirado e seco, passa por quatro fases, quais sejam:

(I) fase do estado seco, com consequente aumento da densidade do solo úmido pela adição de água, até a definição da FMIN;

(II) fase do estado friável ou da formação de agregados, com consequente diminuição da densidade do solo úmido e definição da FMAX, LP (sendo $LP = FMAX$, por definição) e IF;

(III) fase do estado plástico ou da lubrificação, deslizamento e orientação das partículas uma sobre as outras, com consequente aumento na densidade do solo úmido e definição do LL e IP;

(IV) fase do estado viscoso ou fluido, como consequência das grandes películas de água e decréscimo nas forças de coesão entre as partículas sólidas.

A aplicação da mecânica de solo convencional à agronomia, prevê que os tamanhos dos fragmentos primários resultantes dos trabalhos de cultivo são independentes da coesão e somente pouco afetados pelo ângulo de atrito interno (PAYNE,

1956; UTOMO e DEXTER, 1981). Enquanto esses tipos de teoria são utilizados na previsão das forças de tração de simples implementos, elas não são de uso na previsão da quantidade de agregados produzidos pelo cultivo. Tanto em laboratório como no campo se observam que diferentes solos, ou até um mesmo solo em diferentes unidades, produzem agregados completamente distintos. Isso deixa claro que outros fatores, além das magnitudes da mecânica convencional, devem estar implicados, e o trabalho de UTOMO e DEXTER (1981) prova isso por meio do valor K (ver item 2.2.3.6).

O termo friabilidade do solo tem sido definido como a tendência de uma massa de solo não confinado desarranjar-se em fragmentos menores, agregados e partículas individuais sob a ação de uma força (BODMAN, 1949). CHRISTENSEN (1930) empregou as relações carga-deformação como forma de medir a friabilidade do solo, e JAMISON (1954) usou o modulo de ruptura. Ambos os métodos, contudo, somente medem a facilidade com que o solo é trabalhado, isto é, a resistência do solo, mas nenhum leva em consideração o tamanho e distribuição dos fragmentos pulverizados resultantes. Um dos objetivos do cultivo é desarranjar a massa de solo em pequenos torrões ou agregados, mas não em partículas minerais individuais ou pó. É desejável, ainda, que os agregados menores apresentem uma maior resistência do que aquela dos grandes torrões. Baseado nisso é que UTOMO e DEXTER (1981) modificaram a definição de BODMAN (1949), para a "tendência de

uma massa de solo não confinado desarranjar-se numa variação de tamanhos de fragmentos menores sob a ação de uma força". Com este novo conceito de friabilidade e do método referido no item 2.2.3.6, ambos propostos por UTOMO e DEXTER (1981), eles verificaram que a máxima friabilidade dos dois solos franco arenosos australianos estudados, ocorreu na unidade aproximadamente igual àquela definida pelo limite de plasticidade de CASAGRANDE (1932). Esses resultados revelam um bom estreitamento com as evidências experimentais obtidas com aqueles métodos citados no item 2.2.3, notadamente o de VILENSKII, RYZHOV, GODLIN (citados por REVUT e RODE, 1981), e de LIMA (1970). Por outro lado, quando se observam os dados de FMAX e LP obtidos por LIMA (1970), verifica-se que para as três séries de solos estudados, os valores de LP foram todos superiores à FMAX, de 8,96 até 11,4 unidades percentuais. Essas diferenças são contrastantes com aquelas obtidas pelos métodos citados por REVUT e RODE (1981). Embora isso não tenha sido comentado por LIMA (1970), mostra-se que o limite LP de CASAGRANDE (1932) e a FMAX, nem sempre são próximos. Logo, a questão que surge de imediato é a seguinte : "Qual dos limites, LP ou FMAX , verdadeiramente constitui a unidade de mudança entre os estados friável e plástico ?". Para responder essa questão, vários fatos devem ser considerados. Em princípio, as diferenças entre LP e FMAX podem estar relacionadas às diferenças granulométricas em ambas as

determinações, ou seja, da não participação das frações areia grossa e parte da média (pela classificação americana), além dos agregados maiores do que 0,42mm na determinação do LP. Apesar das limitações levantadas por BODMAN (1949) na determinação do LP pelo método de CASAGRANDE (1932), esse método permanece inalterado desde sua origem. Por se tratar de um método empírico, subjetivo e apresentar pouca reprodutibilidade, SHERWOOD (1970) o considera indesejável. Foi também com o objetivo de eliminar as deficiências do método de CASAGRANDE (1932), que o método do penetrômetro de queda livre foi proposto por CAMPBELL (1976). Usando exatamente o mesmo procedimento no preparo das amostras daquele sugerido por CASAGRANDE (1932), os valores de LP pelo método de CAMPBELL (1976) foram sempre numericamente menores do que aqueles obtidos pelo método de CASAGRANDE (1932), nos dezoito solos estudados, com variação de 3 a 12 unidades percentuais. Na comparação entre os valores de LP determinados por CAMPBELL (1976) e CASAGRANDE (1932) frente ao comportamento mecânico do solo, como coesividade, fricção solo-metal, susceptibilidade à compactação, e outros, CAMPBELL et al. (1980) constataram que todas as relações exibiram pontos de mudança em umidades do solo mais próximas daquelas correspondentes ao LP determinado pelo cone de queda livre, do que pelo método de CASAGRANDE (1932). Eles também concluíram ser o cone de queda livre o melhor indicador do comportamento do solo em condições de campo, bem como da unidade de mudança entre os

estados friável e plástico. Diante dessas considerações e pelo fato mais importante de que a presença dos dois pontos de inflexão nas curvas da densidade do solo úmido em função da umidade, confirmadas em todos os solos analisados por LIMA (1970), evidenciarem que mudanças no estado físico do solo ocorrem nesses dois pontos, conclui-se que a F_{MAX} é que verdadeiramente constitui a umidade de mudança entre os estados friável e plástico de um solo.

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 SOLOS

O trabalho foi desenvolvido com a classe de solo definida como LATOSSOLO ROXO. Esta classe é constituída por solos minerais, não hidromórficos, com horizonte B latossólico, formados a partir de rochas eruptivas básicas. Apesar de apresentarem uma relativa baixa capacidade de troca catiônica, são solos que respondem muito bem à adubação, o que talvez possa ser explicada pela participação da matéria orgânica existente na camada superficial (EMBRAPA, 1984).

FASOLO (1978) ; COSTA LIMA (1978), SANTOS FILHO (1977), constataram que os minerais predominantes nos latossolos roxo do Estado do Paraná, são a caulinita e a gibsita, seguidos pela vermiculita cloritizada, hematita, goetita e boemita. Teores variados de materiais amorfos também foram identificados.

Aproximadamente 12.573km² dos solos desta classe, no Estado do Paraná, são distróficos; 6.734km² são álicos e 8.896km² são eutróficos. São solos bastante profundos, de textura muito argilosa e ocorrem em relevo suave (entre 2 e 8%), o que os caracterizam como propícios à uma intensa mecanização. São encontrados em altitudes bastantes variadas, desde 200m (Foz do Iguaçu), até acima de 900m (Apucarana e Manoel Ribas).

A importância agrícola dos latossolos é evidente, tanto que já em 1984, 90% dos solos mapeados já eram explorados

agricolamente. Por outro lado, tem-se observado que o uso contínuo de maquinários pesados nesses solos, tem ocasionado a formação de uma camada compactada entre 15 a 20cm de profundidade (EMBRAPA, 1984).

3.2 LOCALIZAÇÃO E USO DOS SOLOS

Os LATOSSOLOS ROXO são desenvolvidos a partir de rochas oriundas do derrame basáltico e, por isso, apresentam uma ampla distribuição geográfica, ocorrendo tanto ao norte, como no centro, sudeste e oeste do Estado do Paraná. Ocorrem sob floresta tropical ou subtropical, como também sob vegetação de campo sub tropical e cerrado. Onze unidades taxonômicas desta classe foram escolhidas neste trabalho. A opção de seleção dos perfis ocorreu em função dos teores de matéria orgânica, conforme análise descrita por EMBRAPA (1984), considerando-se que a matéria orgânica é um dos mais importantes fatores na definição dos limites e índices de consistência.

Essa classe de solo é predominantemente utilizada para as culturas tradicionais como a cana-de-açúcar; trigo no inverno, soja e milho no verão.

As onze unidades taxonômicas escolhidas da classe dos LATOSSOLOS ROXO e suas respectivas localizações, bem como as legendas adotadas para identificação, encontram-se no quadro 1.

Quadro 1. Legenda, número do perfil correspondente ao levantamento efetuado pela EMBRAPA (1984), município e uso do solo na época da amostragem, das onze unidades taxonômicas da classe dos LATOSSOLOS ROXO do Estado do Paraná selecionados.

SOLO	N DO PERFIL EMBRAPA (1984)	MUNICÍPIO	USO NA ÉPOCA DA AMOSTRAGEM
LIM	--	Londrina	mato
LCE	--	Londrina	café
MAR	18	Marialva	soja/trigo
CMO	35	Campo Mourão	cana-de-açúcar
LAR	31	Laranj. do Sul	campo
LIE	17	Londrina	ervilhaca
FOI	--	Foz do Iguaçu	soja/trigo
CMB	19	Cambará	soja/trigo
TOL	32	Toledo	soja/trigo
JUR	28	Juranda	soja/trigo
UBI	22	Ubiratã	soja/trigo

3.3 COLETA E PREPARO DAS AMOSTRAS

Pelo fato de ser bastante comum o pé-de-arado e pé-de-grade coletaram-se amostras deformadas em duas camadas, quais sejam, 0 a 15 e 15 a 30cm, num total de aproximadamente 25Kg de solo para cada camada. Nos casos onde as trincheiras já haviam sido enterradas, foram abertas novas o mais próximo possível do local anteriormente descrito por EMBRAPA (1984).

Em laboratório, os solos foram secados ao ar durante 10 dias, peneirados em tamiz de 2mm e homogeneizados. A partir daí, parte desse material (aproximadamente 2kg) foi novamente passado em tamiz de 0,42mm para posteriores determinações dos limites de plasticidade.

3.4 ANÁLISES QUÍMICA E GRANULOMÉTRICA

A análise granulométrica das onze unidades

Quadro 2. Resultados da análise granulométrica e alguns momentos estatísticos das camadas de 0 a 15 e 15 a 30cm de onze unidades taxonômicas da classe dos LATOSSOLOS ROXO do Estado do Paraná.

SOLO	CAMADA cm	AREIA	SILTE %	ARGILA
LIM	0-15	4	22	74
	15-30	4	19	77
LCE	0-15	6	24	70
	15-30	4	24	72
MAR	0-15	11	14	75
	15-30	8	12	80
CMO	0-15	8	11	81
	15-30	7	9	84
LAR	0-15	2	28	70
	15-30	2	23	75
LIE	0-15	2	19	79
	15-30	2	18	80
FOI	0-15	3	22	75
	15-30	2	20	78
CMB	0-15	3	28	69
	15-30	3	23	74
TOL	0-15	2	17	81
	15-30	2	15	83
JUR	0-15	8	18	74
	15-30	7	19	74
UBI	0-15	9	26	65
	15-30	7	21	72
MÉDIA (%)		4.82	19.64	75.55
VALOR MÁXIMO (%)		11	28	84
VALOR MÍNIMO (%)		2	9	65
VARIAÇÃO (%)		9	19	19
VARIÂNCIA		8.06	27.00	23.69
DESVIO PADRÃO		2.84	5.20	4.87
ERRO PADRÃO		0.61	1.12	1.04
COEF. VARIAÇÃO (%)		58.93	26.46	6.44

* média de três repetições

taxonômicas, para as camadas de 0 a 15 e 15 a 30cm, foi realizada através do método da pipeta descrita por EMBRAPA (1979), utilizando-se de amostras passadas em tamiz de 2mm. Os resultados encontram-se no quadro 2, que inclui alguns momentos estatísticos.

Quanto a análise de caracterização química, utilizou-se a

Quadro 3. Resultados da análise de caracterização química e alguns momentos estatísticos das camadas de 0 a 15 e 15 a 30cm de onze unidades taxonomicas da classe dos LATOSSOLOS ROXO do Estado do Paraná.

SOLU	CAMADA cm	CARBONO* %	pH _{KCl}	pH _{CaCl2}	pH _{H2O}	DELTA pH	CÁLCIO	MAGNÉSIO	POTÁSSIO mg/100g	CTC	H+Al	N	P	FOSFORO ppm
LIM	0-15	2.26	4.38	5.1	5.17	-0.79	3.1	1.7	0.31	11.9	6.8	7.3	42.9	4
	15-30	2.06	4.33	5.0	5.09	-0.76	3.0	2.0	0.19	13.0	7.8	8.8	40.0	3
LCE	0-15	1.28	4.68	5.5	5.60	-0.92	3.6	2.1	0.31	11.3	5.3	0.0	53.1	13
	15-30	1.07	4.66	5.3	5.35	-0.69	3.3	1.8	0.18	9.7	4.4	3.6	54.5	4
MAE	0-15	1.94	4.64	5.4	5.45	-0.81	4.5	2.1	0.72	13.0	5.7	2.7	56.2	4
	15-30	1.28	4.48	5.2	5.30	-0.82	4.2	1.4	0.22	10.8	5.0	4.9	53.8	1
CNO	0-15	1.97	5.27	6.2	6.20	-0.93	6.8	1.2	0.44	12.4	4.0	0.0	67.8	3
	15-30	1.80	5.42	6.3	6.51	-1.09	5.8	1.0	0.40	10.1	2.9	0.0	71.3	1
LAR	0-15	4.01	4.18	4.8	4.98	-0.80	0.6	0.6	0.30	15.7	14.2	63.4	7.6	1
	15-30	2.71	4.18	4.8	5.05	-0.87	0.2	0.3	0.14	12.6	12.0	74.8	5.1	1
LIE	0-15	1.11	5.07	5.9	5.98	-0.91	2.6	2.2	0.33	9.2	4.1	0.0	55.6	4
	15-30	1.09	4.50	5.2	5.21	-0.71	2.0	1.8	0.19	8.8	4.8	7.0	65.4	3
FOI	0-15	1.53	4.91	6.0	6.10	-1.15	5.7	2.1	0.62	12.5	4.1	0.0	67.3	18
	15-30	1.10	4.79	5.9	6.00	-1.21	5.2	2.0	0.26	11.3	13.8	0.0	66.3	4
EME	0-15	3.62	4.14	4.8	5.01	-0.87	0.7	0.5	0.33	15.3	3.8	60.1	10.0	2
	15-30	2.81	4.17	4.9	4.91	-0.72	0.2	0.3	0.12	12.7	12.1	78.0	4.7	1
TOL	0-15	1.42	3.97	4.8	4.97	-0.98	1.5	1.1	0.20	11.3	8.5	41.7	24.8	10
	15-30	1.06	4.08	4.7	4.92	-0.84	1.0	0.7	0.10	8.1	6.3	50.0	22.2	2
OUR	0-15	2.24	4.33	5.2	5.35	-1.02	2.6	1.0	0.09	10.9	7.2	2.8	33.7	3
	15-30	1.40	4.24	4.9	5.09	-0.85	1.0	0.8	0.05	8.1	6.2	30.2	23.0	1
URI	0-15	2.45	4.47	5.2	5.40	-0.93	2.2	1.3	0.06	11.4	7.8	7.9	31.3	17
	15-30	2.06	4.38	5.1	5.20	-0.82	1.3	0.9	0.06	9.5	7.2	21.0	23.9	3
MEDIA (%)		1.87	4.51	5.27	5.40	-0.86	2.78	1.31	0.26	11.35	7.0	21.41	32.22	4.68
VALOR MAXIMO (%)		4.01	5.42	6.30	6.51	-0.69	6.8	2.2	0.72	15.7	4.2	78.0	71.3	18.00
VALOR MINIMO (%)		1.06	3.97	4.70	4.91	-1.21	0.2	0.3	0.05	8.1	2.9	0.0	4.7	1.00
VARIACAO (%)		2.95	1.43	1.60	1.60	0.52	6.6	1.9	0.67	7.6	11.3	78.0	66.4	17.00
VARIANCIA		0.89	0.15	0.23	0.22	0.02	3.78	0.41	0.03	4.12	10.81	723.6	465.5	25.64
DESVIO PADRAO		0.93	0.38	0.48	0.47	0.14	1.94	0.64	0.18	2.03	3.29	26.9	21.58	5.07
ERRO PADRAO		0.18	0.08	0.10	0.10	0.03	0.41	0.14	0.04	0.43	0.70	5.74	4.6	1.03
COEF. VARIACAO (%)		43.13	8.53	9.13	8.61	15.92	69.97	48.45	63.51	17.89	46.96	125.62	55.01	108.17

* média de três repetições.

metodologia de rotina descrita por EMBRAPA (1979), exceto para a determinação do carbono, para a qual se utilizou o método modificado de RAIJ e QUAGGIO (1979). Os resultados das análises, expressos em porcentagem de peso, com alguns momentos estatísticos respectivos, encontram-se no quadro 3.

3.5 DETERMINAÇÃO DOS LIMITES E ÍNDICES DE PLASTICIDADE

As determinações dos limites de liquidez (ou limite superior de plasticidade) e de plasticidade, seguiram as metodologias de CASAGRANDE (1932), ambas descritas nos itens 2.2.1.1 e 2.2.2.1, respectivamente. Essas determinações foram realizadas no laboratório de mecânica do solo do Departamento de Estradas de Rodagem (Paraná). O índice de plasticidade foi obtido pela diferença entre o primeiro e o segundo, ambos expressos em porcentagem.

3.6 DETERMINAÇÕES DOS LIMITES E ÍNDICE DE FRIABILIDADE.

As determinações dos limites de friabilidade seguiram a metodologia proposta por LIMA (1970), descrita no item 2.2.3.5. Por outro lado, testes prévios mostraram que a betoneira utilizada nessa metodologia não foi adequada para solos muito argilosos como os latossolos roxo. A dificuldade ocorreu na definição das curvas de friabilidade, as quais, a partir de uma

certa porcentagem de água adicionada, seccionava a curva da densidade úmida em função da umidade. Optou-se, então, pela utilização de um vibrador mecânico, tal como utilizado no peneiramento de amostras via seca, por permitir ao operador complementar a homogeneização da amostra manualmente depois da adição de água, simultaneamente à agitação do aparelho. Outra adaptação no método, foi a utilização da amostra TFSA passada em tamiz de 2mm, ao invés de 1mm como originalmente proposto.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A partir da metodologia descrita no ítem 3.6, adaptada de LIMA(1970), foram obtidos os dados experimentais da densidade do solo úmido para diferentes unidades gravimétricas. Esses valores são apresentados no anexo I, para as camadas de 0 a 15 e 15 a 30cm, dos onze solos considerados. Nas figuras de 3 a 13 estão apresentados, para cada solo, as relações funcionais entre esses valores, por camada, com suas respectivas curvas de ajustes, todas elaboradas manualmente. Também estão indicadas, nessas figuras, os valores de densidade nos pontos de friabilidade máxima e mínima do solo úmido (DSMAX e DSMIN), bem como os limites e índices de friabilidade (FMIN, FMAX e IF), todos obtidos nos pontos de inflexão das respectivas curvas de ajuste, de acordo com LIMA (1970)). Os valores de FMIN e FMAX representam os conteúdos de água, em porcentagem, correspondentes àqueles de máxima e mínima densidade do solo úmido, respectivamente, enquanto que o índice IF se refere à diferença entre eles (LIMA, 1970).

Para melhor visualização e facilidade na interpretação dos resultados, o quadro 4 resume todos os limites e índices de friabilidade, juntamente com os valores experimentais dos limites de plasticidade (LP), de liquidez (LL) e do índice de plasticidade (IP) para as camadas de 0 a 15 e 15 a 30cm dos onze

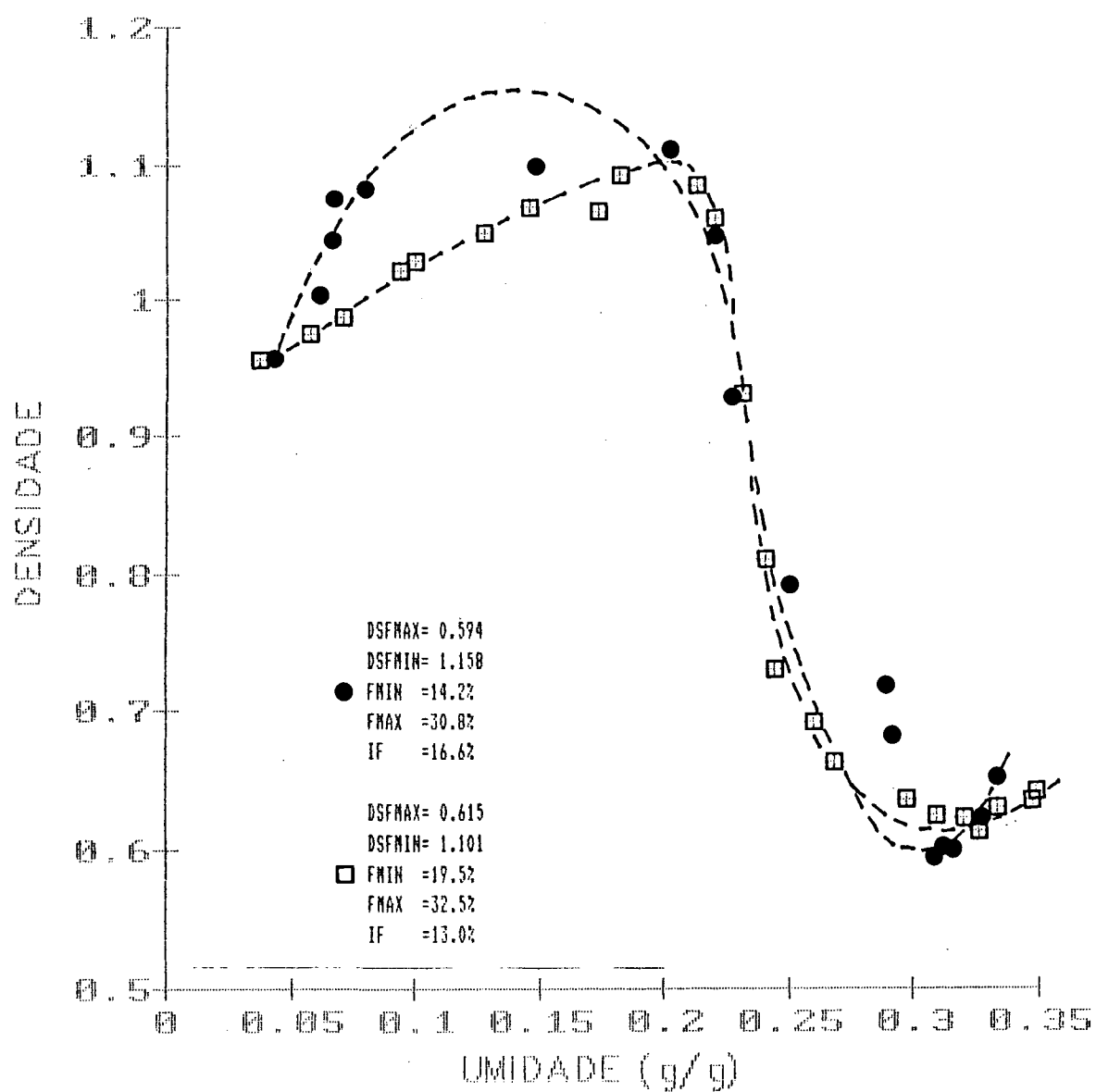


Figura 3. Relação entre a densidade úmida e umidade gravimétrica das camadas de 0 a 15cm (●) e 15 a 30cm (□) do solo LIM

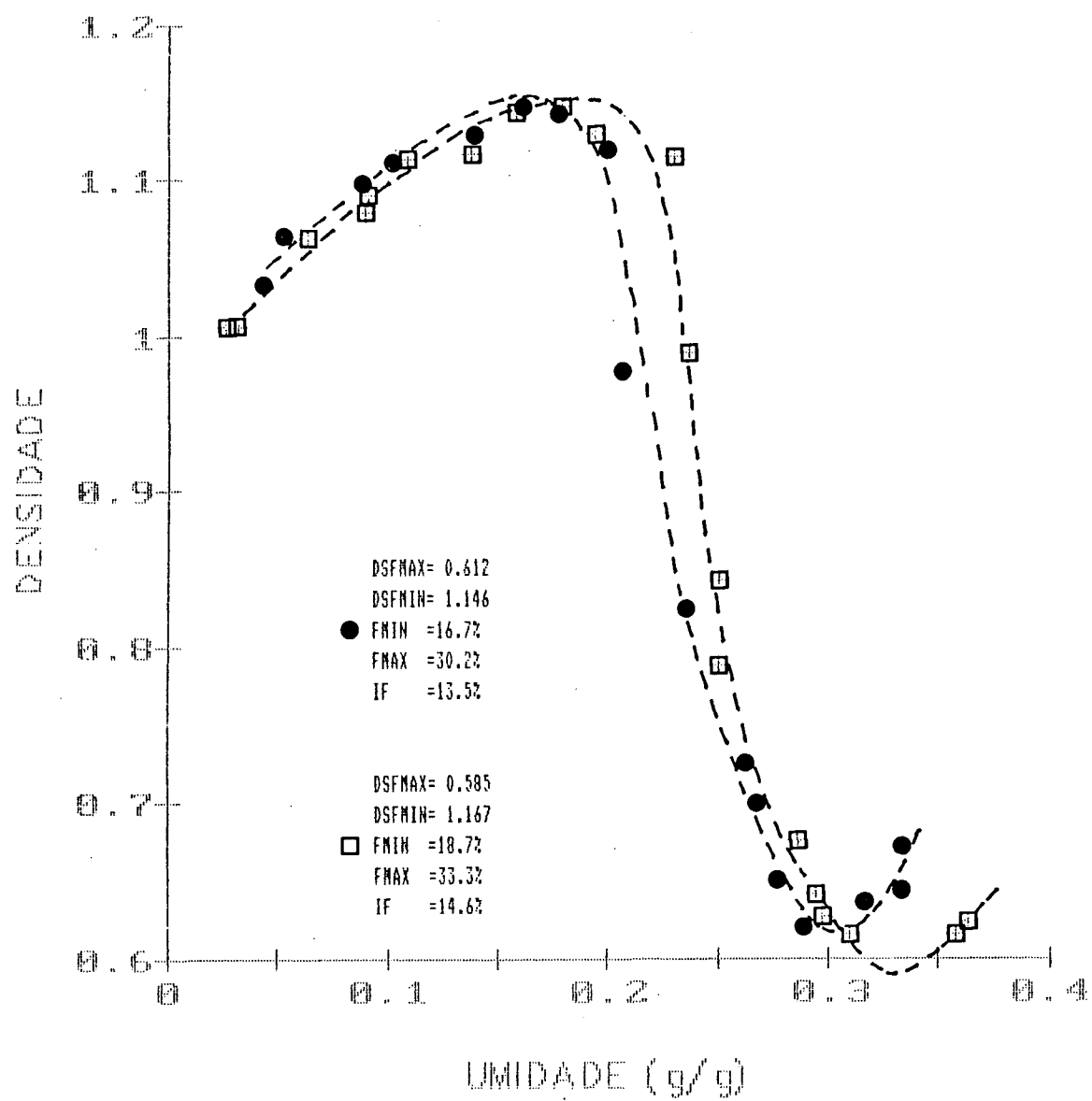


Figura 4. Relação entre a densidade úmida e umidade gravimétrica das camadas de 0 a 15cm (●) e 15 a 30cm (□) do solo LCE

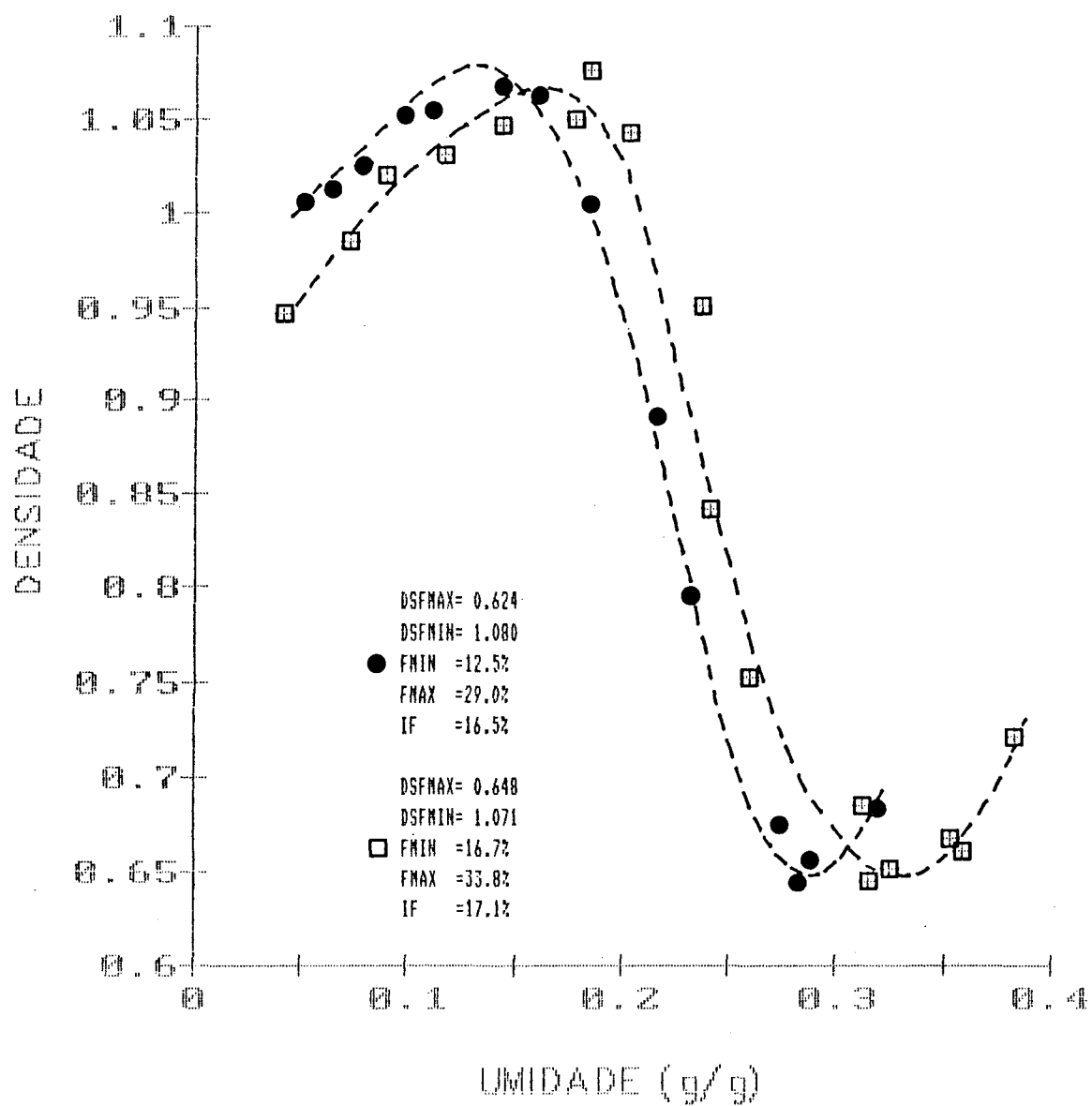


Figura 5. Relação entre a densidade úmida e umidade gravimétrica das camadas de 0 a 15cm (●) e 15 a 30cm (□) do solo MAR

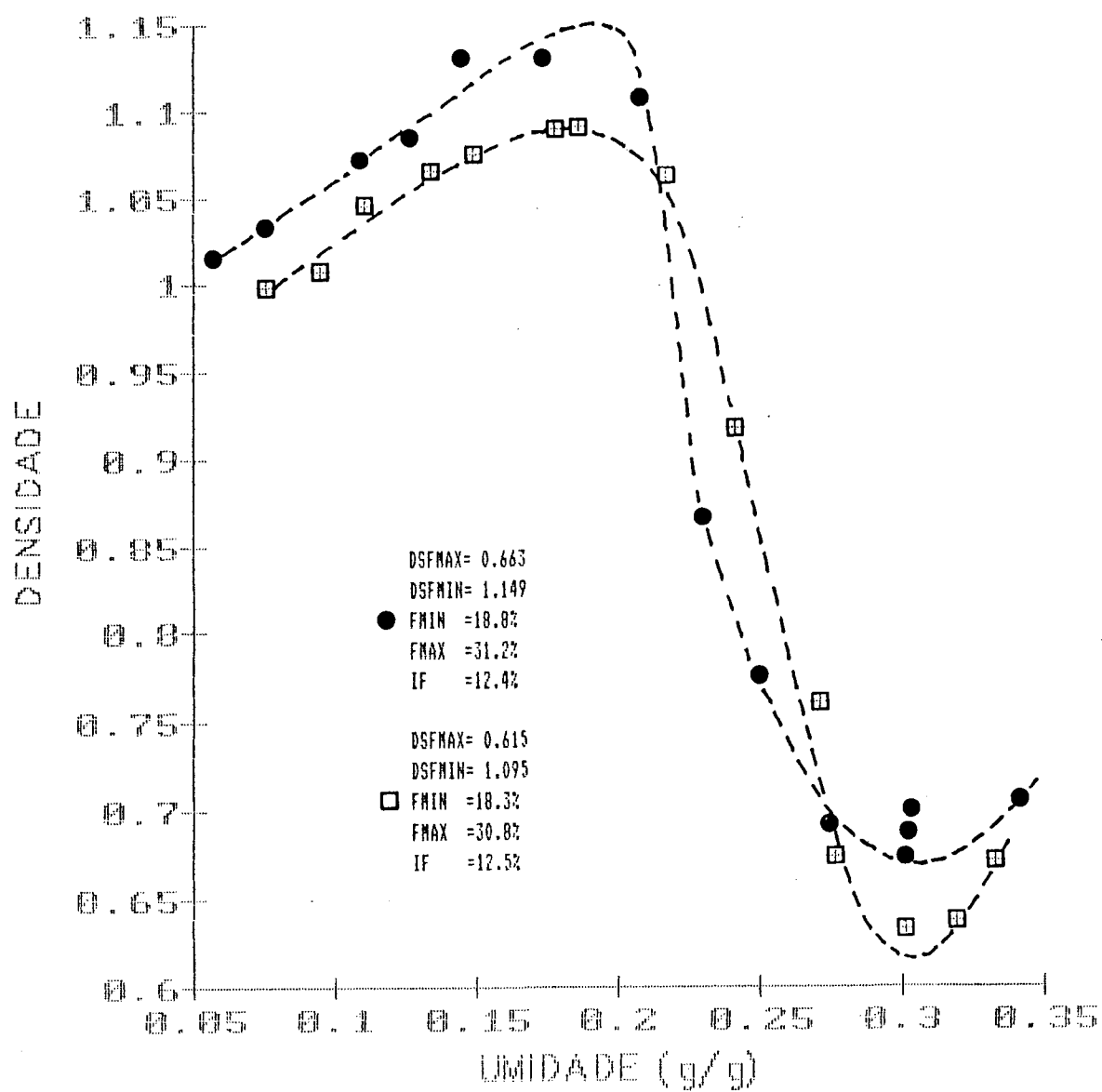


Figura 6. Relação entre a densidade úmida e umidade gravimétrica das camadas de 0 a 15cm (●) e 15 a 30cm (□) do solo CMO

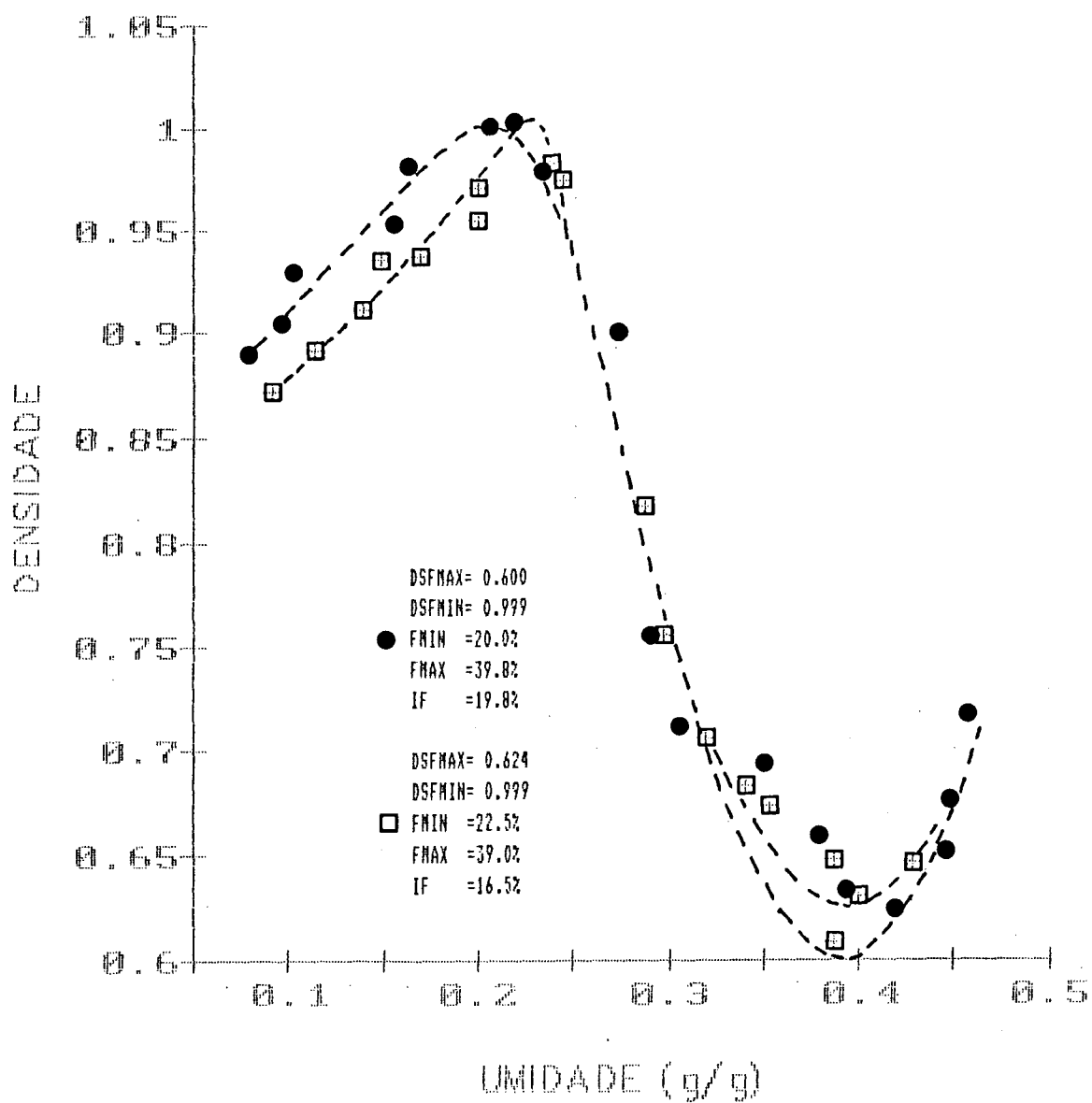


Figura 7. Relação entre a densidade úmida e umidade gravimétrica das camadas de 0 a 15cm (●) e 15 a 30cm (□) do solo LAR

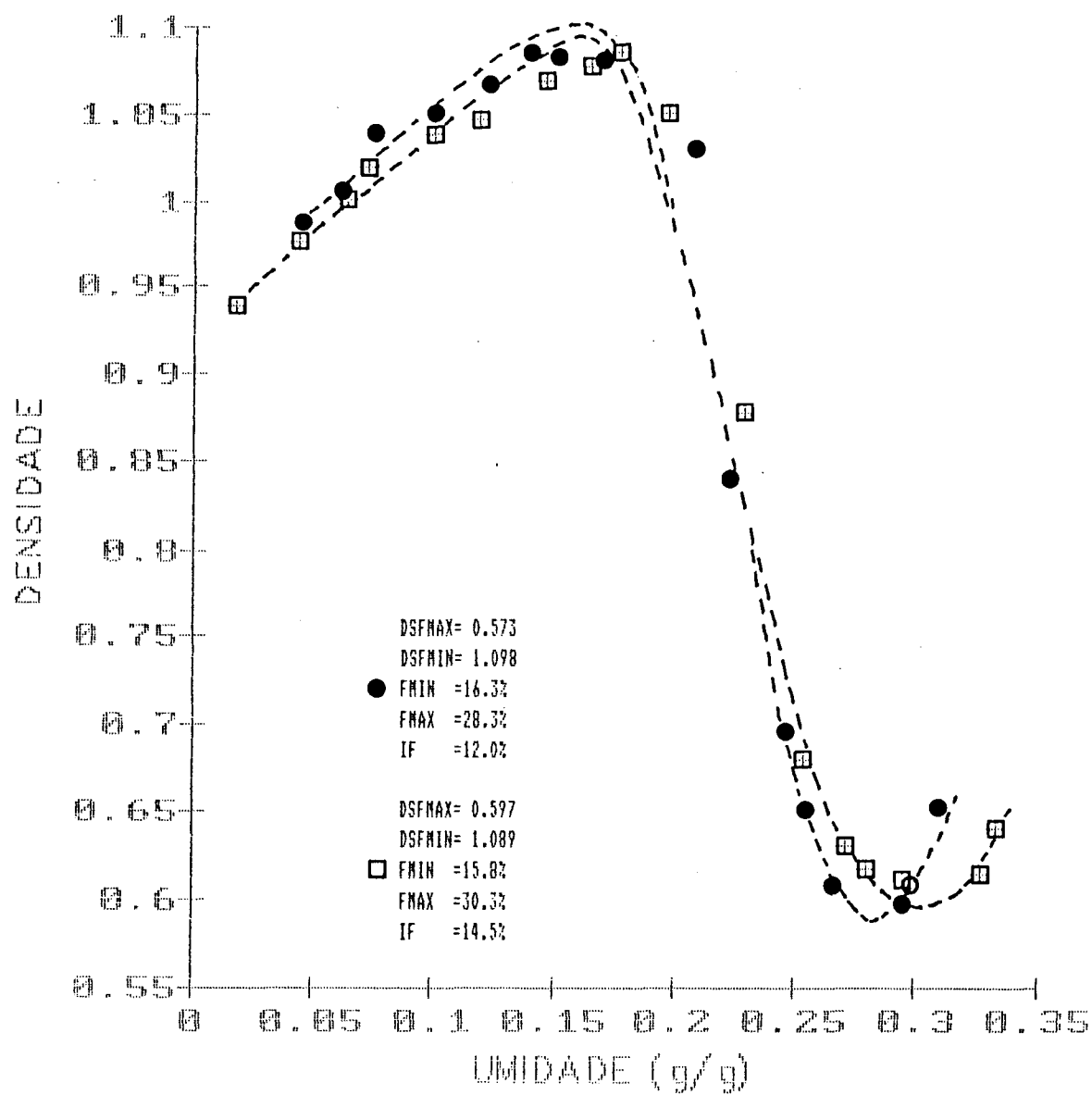


Figura 8. Relação entre a densidade úmida e umidade gravimétrica das camadas de 0 a 15cm (●) e 15 a 30cm (□) do solo LIE

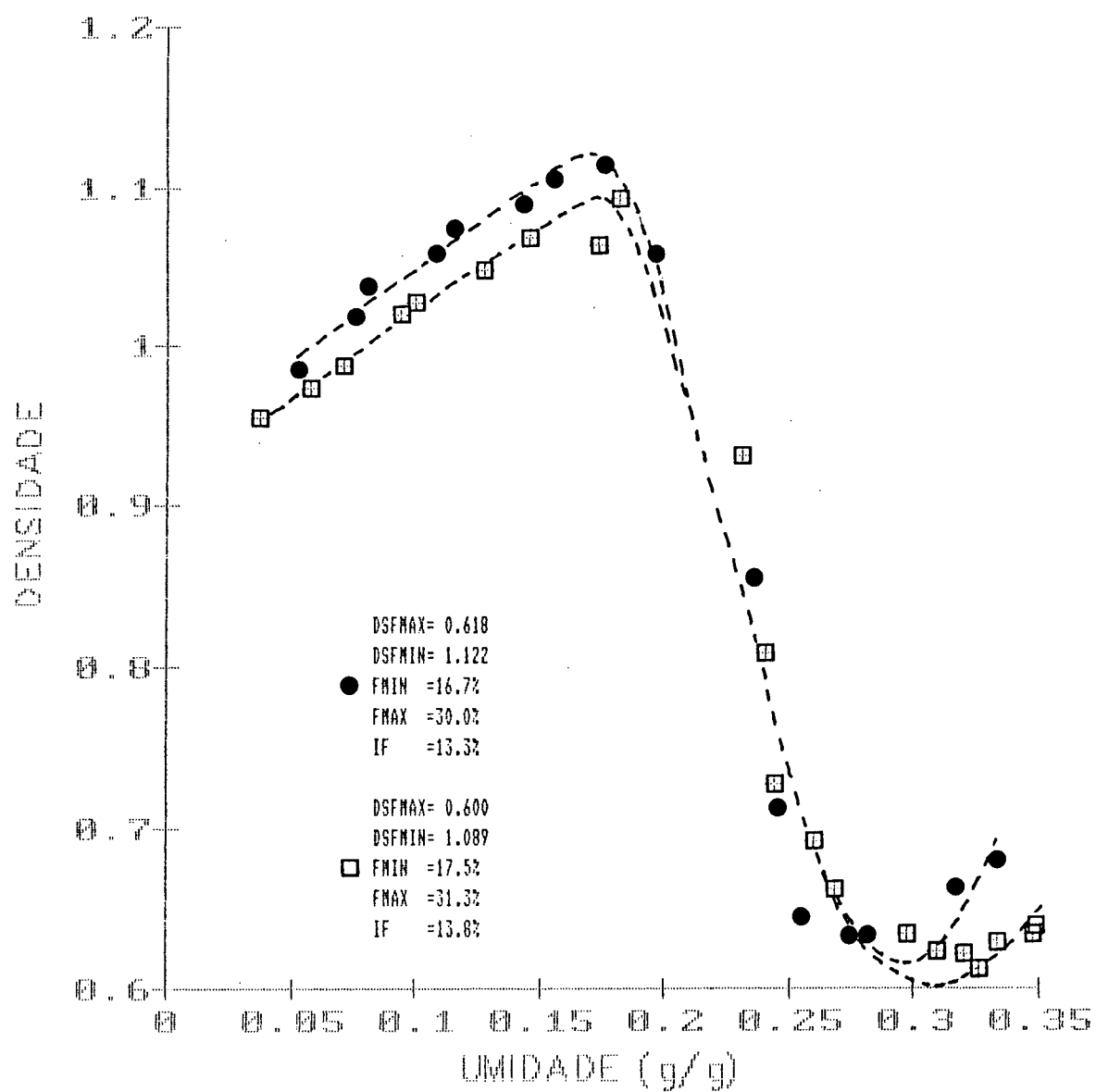


Figura 9. Relação entre a densidade úmida e umidade gravimétrica das camadas de 0 a 15cm (●) e 15 a 30cm (□) do solo FOI

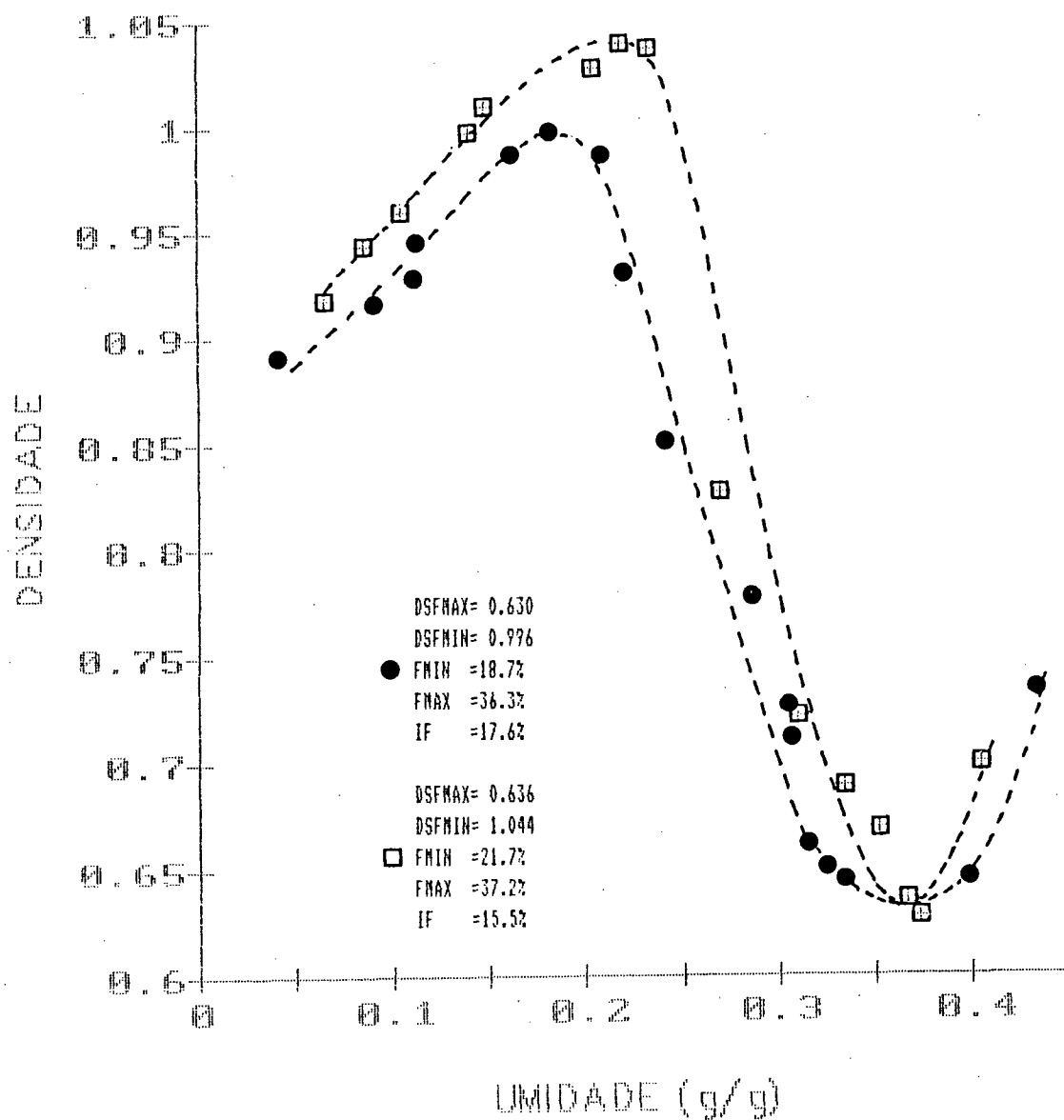


Figura 10. Relação entre a densidade úmida e umidade gravimétrica das camadas de 0 a 15cm (●) e 15 a 30cm (□) do solo CMB

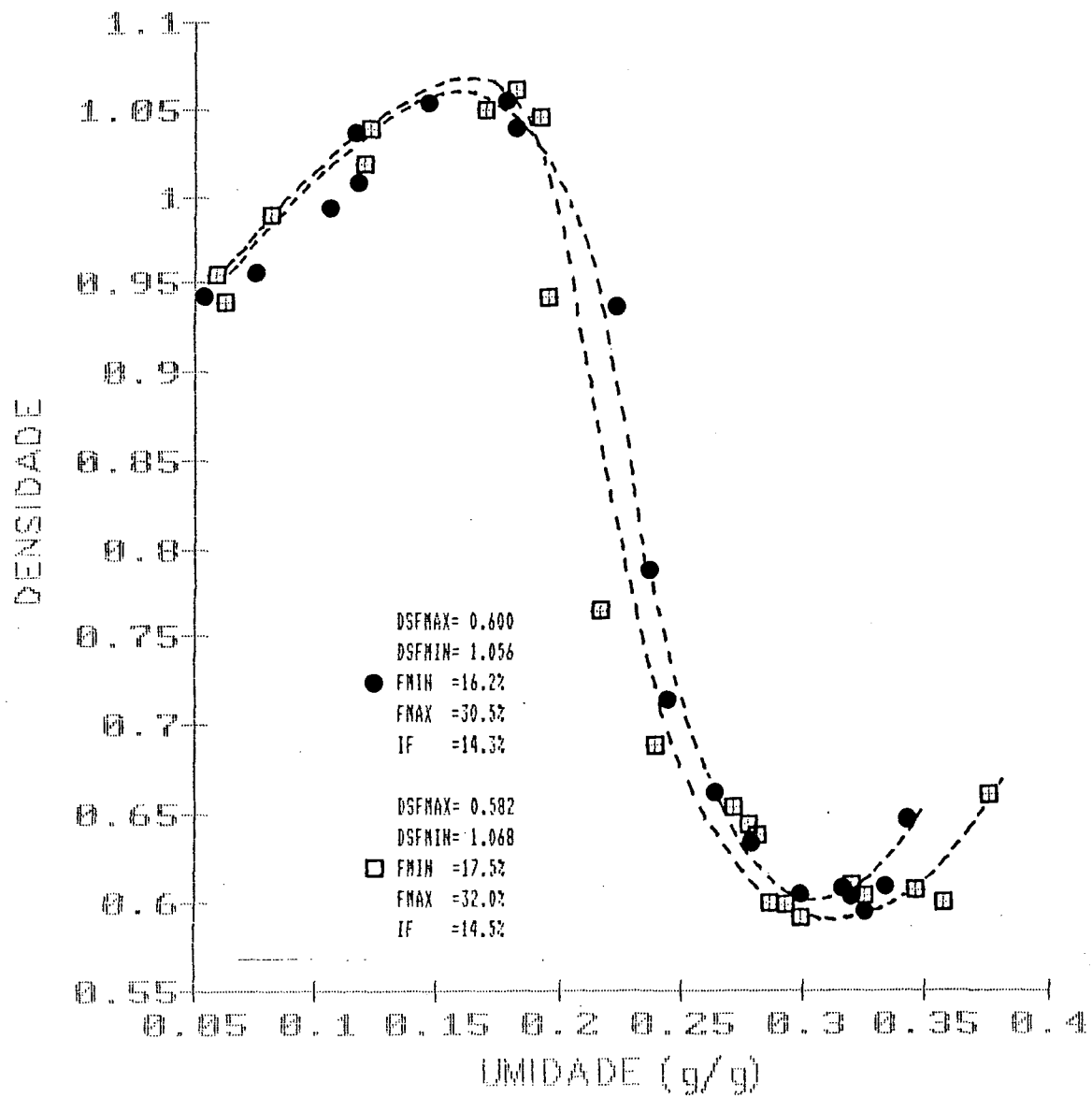


Figura 11. Relação entre a densidade úmida e umidade gravimétrica das camadas de 0 a 15cm (●) e 15 a 30cm (□) do solo TOL.

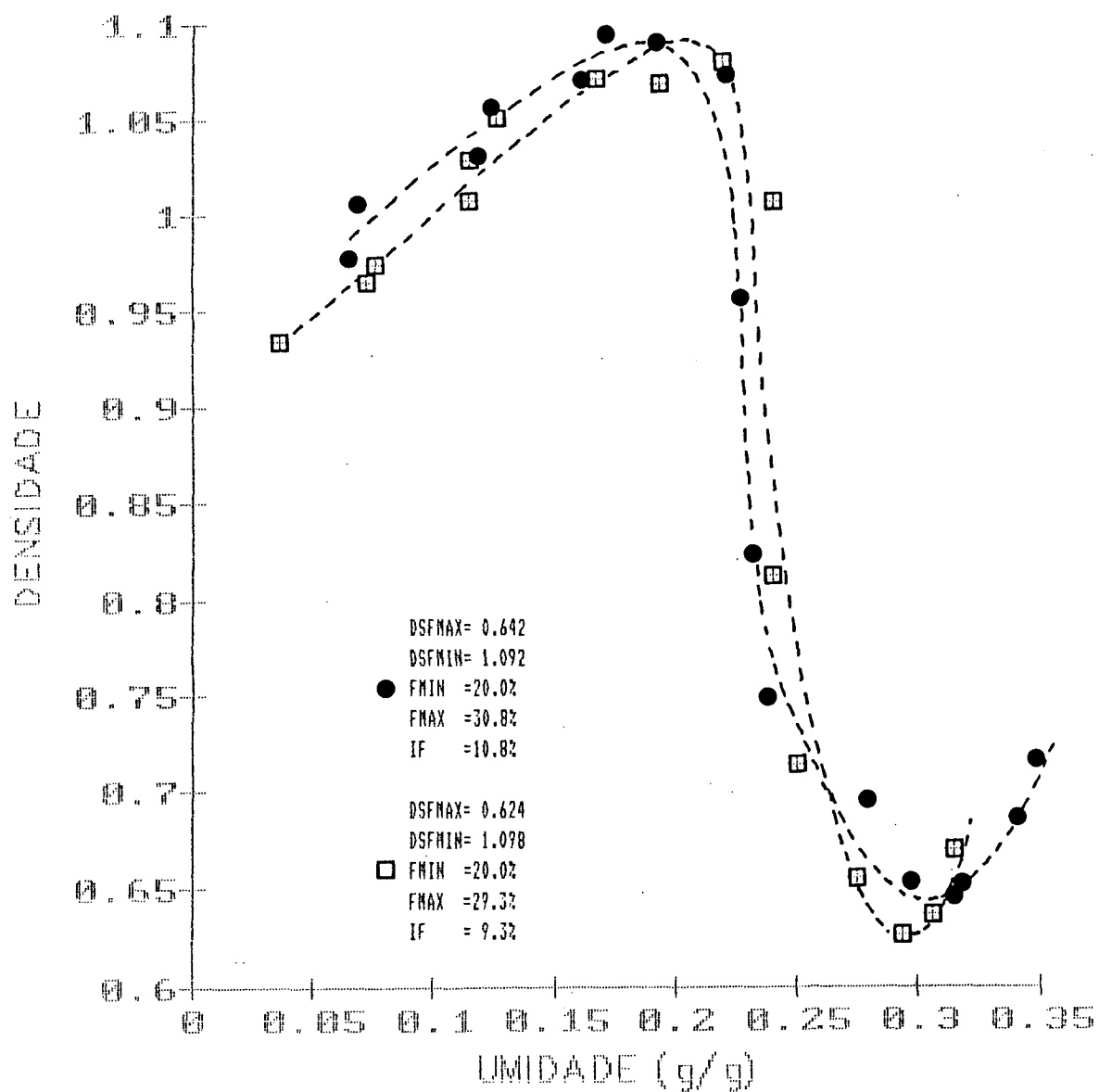


Figura 12. Relação entre a densidade úmida e umidade gravimétrica das camadas de 0 a 15cm (●) e 15 a 30cm (□) do solo JUR.

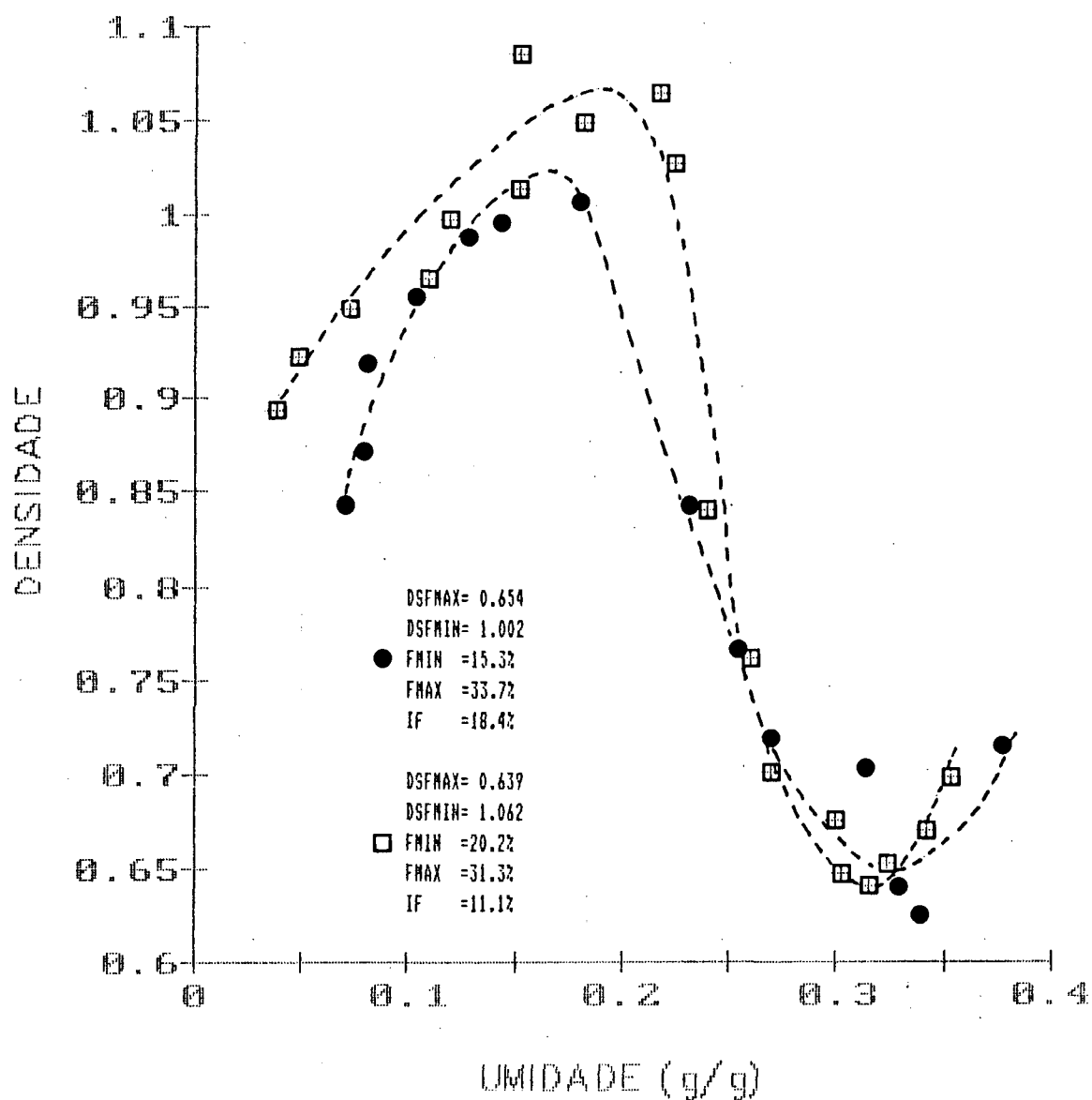


Figura 13. Relação entre a densidade úmida e umidade gravimétrica das camadas de 0 a 15cm (●) e 15 a 30cm (□) do solo UBI.

Quadro 4. Valores de FMIN, FMAX, IF, DSFMIN, DSFMAX, LP, LL, IP, IP/ARG, e alguns momentos estatísticos desses valores para as camadas de 0 a 15 e 15 a 30cm de onze unidades taxonômicas da classe dos LATOSSOLOS ROXO do Estado Paraná.

SOLO	CAMADA (cm)	FMIN z	FMAX z	IF z	DSFMIN --	DSFMAX --	LP(1) z	LL(2) z	IP z	IP/ARG --	US z
LIM	0 - 15	14.2	30.8	16.6	1.158	0.594	31.3	51.1	19.8	0.268	72.52
	15 - 30	19.5	32.5	13.0	1.101	0.615	32.4	51.5	19.1	0.248	71.86
LCE	0 - 15	16.7	30.2	13.5	1.146	0.612	30.9	49.2	18.3	0.261	66.21
	15 - 30	18.7	33.3	14.6	1.167	0.585	31.4	47.8	16.4	0.228	67.28
MAR	0 - 15	12.5	29.0	16.5	1.080	0.624	30.0	53.6	23.6	0.315	67.49
	15 - 30	16.7	33.8	17.1	1.071	0.648	34.3	54.0	19.7	0.246	67.73
CNO	0 - 15	18.8	31.2	12.4	1.149	0.663	34.6	53.7	19.1	0.236	66.85
	15 - 30	18.3	30.8	12.5	1.095	0.615	33.5	54.4	20.9	0.249	67.85
LAR	0 - 15	20.0	39.8	19.8	0.999	0.600	41.2	65.8	24.6	0.351	87.77
	15 - 30	22.5	39.0	16.5	0.999	0.624	39.4	57.6	18.2	0.243	85.19
LIE	0 - 15	16.3	28.3	12.0	1.098	0.573	28.7	47.0	18.3	0.232	67.31
	15 - 30	15.8	30.3	14.5	1.089	0.597	32.2	51.3	19.1	0.239	69.38
FOI	0 - 15	16.7	30.0	13.3	1.122	0.618	29.7	52.7	23.0	0.307	67.71
	15 - 30	17.5	31.3	13.8	1.089	0.600	28.0	46.7	18.7	0.240	66.33
CMB	0 - 15	18.7	36.3	17.6	0.996	0.630	36.5	61.8	25.3	0.367	86.19
	15 - 30	21.7	37.2	15.5	1.044	0.636	38.2	60.5	22.3	0.301	78.53
TOL	0 - 15	16.2	30.5	14.3	1.056	0.600	30.7	50.3	19.6	0.242	72.63
	15 - 30	17.5	32.0	14.5	1.068	0.582	33.5	49.2	15.7	0.189	69.05
JUR	0 - 15	20.0	30.8	10.8	1.092	0.642	31.4	52.1	20.7	0.280	69.56
	15 - 30	20.0	29.3	9.3	1.098	0.624	28.9	51.0	22.1	0.299	67.28
UBI	0 - 15	15.3	33.7	18.4	1.002	0.654	34.2	48.3	14.1	0.217	76.22
	15 - 30	20.2	31.3	11.1	1.062	0.639	31.0	49.6	18.6	0.258	75.48
MÉDIA (z)		17.9	32.34	14.44	1.081	0.617	32.82	52.69	19.87	0.264	72.11
VALOR MÁXIMO (z)		22.5	39.8	19.8	1.167	0.663	41.2	65.8	25.3	0.367	87.77
VALOR MÍNIMO (z)		12.5	28.3	9.3	0.996	0.573	28.0	46.7	14.1	0.189	66.21
VARIAÇÃO (z)		10.0	11.5	10.5	0.171	0.09	13.2	19.1	11.2	0.178	21.56
VARIÂNCIA		5.86	0.96	6.91	0.003	0.001	12.18	24.12	7.79	0.002	45.23
DESVIO PADRÃO		2.42	3.16	2.63	0.051	0.024	3.49	4.91	2.79	0.043	6.73
ERRO PADRÃO		0.52	0.67	0.56	0.011	0.005	0.74	1.05	0.59	0.009	1.43
COEF. VARIAÇÃO (z)		13.52	9.76	18.21	4.73	3.91	10.64	9.32	14.04	16.39	9.33

(1) média de três repetições.

(2) obtido por interpolação na relação gráfica entre a umidade gravimétrica e o log (número de golpes), segundo Casagrande (1932).

solos. Também são apresentados, no mesmo quadro, os valores de DSFMIN, DSFMAX, IP/ARG (definido por Mitchell, 1976; BAVER et al. 1972; EL-SWAIFY, 1980, dentre outros, como razão de atividade), US (umidade gravimétrica na saturação), além de alguns momentos estatísticos para todas as variáveis.

Como se observa, tanto os limites como o índice de friabilidade variaram dentro de intervalos aproximadamente iguais, não ultrapassando 11,5 unidades percentuais. Os valores médios dos limites de friabilidade, por outro lado, foram marcadamente diferentes, ou seja, 17,9% para a FMIN e 32,3% para a FMAX, com índice de friabilidade médio de 14,4%. Dentre as várias interpretações sugeridas por LIMA (1970) para os limites FMIN e FMAX, provavelmente a mais importante, do ponto de vista agrônomo, reside no fato de que eles representam o início e o final do estado de sãção do solo, ou seja, as umidades de mudança entre os estados de consistência sêco/friável e friável/plástico, respectivamente. De acordo com esse autor, portanto, as umidades gravimétricas médias de 17,9% e 32,3% são, pois, para os solos e camadas consideradas neste trabalho, os valores mínimo e máximo, respectivamente, de umidades nos quais eles podem ser trabalhados mecanicamente sem prejuízo de suas propriedades físicas. Com isso, o índice de friabilidade médio de 14,4%, representa o intervalo médio de umidade dentro do qual se apresenta o melhor estado de agregação para o cultivo nesses solos, até 30 cm de

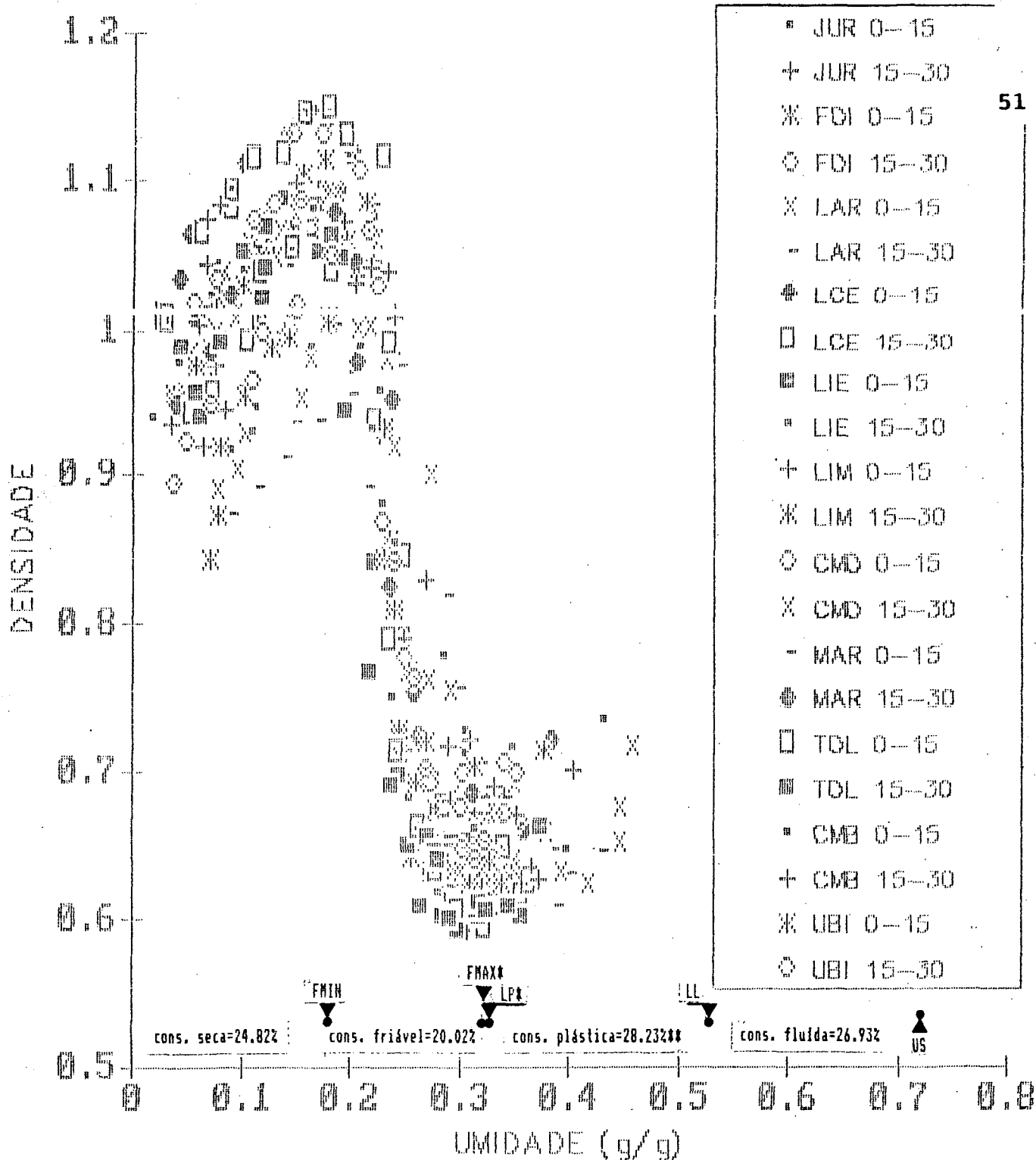


Figura 14. Valores experimentais da densidade úmida em função da umidade gravimétrica, dentro dos intervalos médios de consistência sêca, friável e plástica das camadas de 0 a 15 e 15 a 30cm de onze unidades taxonomicas da classe dos LATOSSOLOS ROXO do Estado do Paraná.

(*) não diferem significativamente ao nível de 5%
 (**) considerada como a diferença entre LL e FMAX

profundidade. Considerando que a umidade gravimétrica média na saturação foi 72,11%, conclui-se que o intervalo médio de friabilidade é relativamente pequeno, isto é, 20,02% (14,44/72,11) diante da magnitude ocupada pelo conjunto dos demais estados de consistência (sêco, plástico e fluído), ou seja 80% (100-20,02).

KACHINSKI, citado por REVUT e RODE (1981), constatou que a umidade de friabilidade ótima para os trabalhos agrícolas dos solonetz russos, foi de cerca de 50 a 60% da umidade de saturação. Para os latossolos, com base no valor médio de FMAX, essa umidade corresponde a 44,8% da saturação, abaixo, portanto, dos solonetz russos.

Quanto aos limites e índices de plasticidade, o quadro 4 mostra que os valores de LP e IP variaram dentro de intervalos próximos daqueles dos limites e índice de friabilidade, ou seja, 13,2 e 11,2 respectivamente. Dentre todos os limites e índices, tanto de friabilidade como de plasticidade, a maior variação entre os valores extremos foi do LL, com 19,1%.

É interessante notar que a média e a variação entre os extremos de LP são muito próximas daquelas encontradas para a FMAX (quadro 4). Foram aplicados dois testes estatísticos para avaliar: i) a hipótese de igualdade entre os valores pareados de FMAX e LP e, ii) a hipótese de igualdade entre as variâncias. Os resultados são mostrados no anexo II, donde se observa, por ambos os testes, a não rejeição das hipóteses de igualdade entre os

valores de FMAX e LP. Isso permite concluir, que a definição de BAVER et al. (1972) para o limite de plasticidade, como a unidade de mudança da consistência friável a plástica, bem como o método de CASAGRANDE (1932) para sua determinação, se aplicam para os solos considerados neste trabalho.

A presença de um mínimo nas curvas densidade versus umidade mostradas nas figuras de 3 a 13, e confirmada em todas as camadas dos solos, sugere que uma importante variação no estado físico do solo ocorre neste ponto, e os testes estatísticos referidos anteriormente mostram que tanto a FMAX como o LP são capazes de identificar esse ponto de mudança entre o estado friável e plástico, indistintamente, mesmo que o valor médio de LP tenha superado a FMAX em 0,48 unidades percentuais. Esta observação está perfeitamente de acordo com GODLIN, citado por REVUT e RODE (1981), que diz que a umidade da FMAX é geralmente 1 a 2 unidades percentuais menor que a umidade correspondente ao limite de plasticidade definido por Atterberg. Também está de acordo com UTOMO e DEXTER (1981), que verificaram que o máximo de friabilidade dos dois solos australianos estudados, embora franco arenosos, ocorreu na umidade aproximadamente igual àquela definida pelo limite de plasticidade de CASAGRANDE (1932).

Com a definição dos valores médios de todos os limites e índices de friabilidade e plasticidade, todos os intervalos médios de cada estado de consistência puderam ser conhecidos,

como também a proporção ocupada por eles, desde a condição de umidade zero até a saturação. Isso é mostrado na figura 14, que também reúne os pontos experimentais da densidade úmida em função da umidade das camadas de 0 a 15 e 15 a 30cm dos onze solos.

Como se observa, o conjunto dos pontos experimentais confere um comportamento bem definido, o que parece ser um bom indicativo de que as amostras pertencem a uma mesma população de solos. Tal como sugerem os pontos experimentais na figura, e comprovam os coeficientes de variação no quadro 4, uma maior variabilidade nos dados ocorre na transição da consistência seca para a friável, do que dessa para a plástica. De fato, os coeficientes de variação dos valores de FMIN e DSFMIN, apesar de baixos, foram 39 e 21% maiores do que aqueles observados para a FMAX e DSFMIN, respectivamente (quadro 4). Mesmo assim, a caracterização dos quatro intervalos médios de consistência indicados na figura 14, permitem concluir, com razoável precisão para a população de solos, que a consistência seca, plástica e fluída, somadas, constituem 80% da porcentagem média de saturação, restando para o estado friável 20%. Também deve ser observado que o intervalo plástico supera o friável em cerca de 1,4 vezes. Admitindo o valor da friabilidade máxima como a umidade de mudança entre as consistências friável e plástica, chega-se a relações muito próximas a essa para as três séries de solos do município de Piracicaba (SP), utilizados por LIMA

(1970), quais sejam: 1,40 para a série "Luiz de Queiroz"; 1,63 para a série "Guamium" e 1,27 para a série "Pau d'alho".

A despeito da importância e real interesse que os limites e índices de consistências representam na Ciência do Solo, é desejável, sobretudo do ponto de vista agronômico, que a relação (IF/% de saturação do solo) seja tanto quanto possível alta, de modo que os demais índices resultem num mínimo. Nesse aspecto, é importante identificar quais os fatores ou características do solo que afetam os limites de consistência, e como eles se relacionam entre si. Para avaliar a existência de algumas associações entre as magnitudes dessas variáveis, isto é, se a variação da magnitude de uma implica numa variação da magnitude da outra, foram feitas algumas correlações lineares simples envolvendo todas as variáveis mostradas no quadro 4 (inclusive entre elas), com as porcentagens de carbono, argila, silte e areia (quadros 2 e 3 do item 3.4). O quadro 5 mostra os resultados das correlações que foram significativas.

Observa-se, de imediato, pelos coeficientes angular e linear da relação LP versus FMAX, a comprovação de igualdade entre seus valores, que se distribuem praticamente coincidentes com a linha 1:1. Também se comprova as esperadas relações diretas entre IF versus FMAX e IP versus LL, como discutido no item 2.3. Pode-se observar, ainda, que os coeficientes angulares como de determinação para os limites FMAX, LP e LL em função do carbono,

foram respectivamente crescentes. Estes fatos, embora esperados, estão de acordo com BAVER et al (1972), quando argumentam da alta capacidade de absorção de água pela matéria orgânica, sendo necessárias crescentes quantidades de água para gerar as consistências plástica e fluída, de acordo com o aumento da matéria orgânica. Isto também explica os baixos coeficientes angular e de determinação da relação IP versus carbono, ou seja,

Quadro 5. Coeficientes de regressão, de determinação e erro padrão da estimativa de algumas correlações entre os limites e índices de consistência, e deles com algumas características dos solos considerados (modelo $Y=A+BX$, onde X é a variável dependente, Y é a variável independente, e A e B são constantes).

Regressão	Constantes		r^2		Erro padrão da estimativa
	A	B			
FMAX=f(carbono)	26,7618	2,8877	0,58	***	2,0963
FMAX=f(silte)	26,1939	0,3128	0,2652*		2,7727
IF=f(carbono)	11,1099	1,7232	0,2977**		2,2578
DSFMIN=f(carbono)	1,1575	-0,0396	0,4169**		0,0399
DSFMAX=f(areia)	0,5909	0,0054	0,4058**		0,0191
FMIN=f(FMAX)	3,4418	0,4471	0,34	**	2,0150
IF=f(FMAX)	-3,4418	0,5529	0,4406***		2,0150
LP=f(carbono)	26,5188	3,2632	0,6057**		2,2458
LL=f(carbono)	43,1140	4,9609	0,7071***		2,7239
IP=f(carbono)	16,5952	1,6978	0,2566*		2,4653
IP/ARG=f(carbono)	0,1981	0,0343	0,4356***		0,0333
LP=f(FMAX)	0,0036	1,0148	0,8422***		1,4207
IP=f(LL)	-1,6702	0,4089	0,5179***		1,0588

*** significativo ao nível de 0,1%

** significativo ao nível de 1%

* significativo ao nível de 5%

a matéria orgânica eleva proporcionalmente os limites de plasticidade e de liquidez, sem contudo promover grandes

alterações nas diferenças entre ambos. A semelhança entre os coeficientes angulares e de determinação entre as relações IP versus carbono e IF versus carbono, sugere um igual comportamento para os limites de friabilidade, embora não se tenha obtido uma significativa relação entre FMIN versus carbono. Dentre todas as propriedades químicas caracterizadas no quadro 3 do item 3.4, a que melhor se correlacionou com a FMIN foi o Magnésio, através da equação $FMIN = 21,2714 - 2,56645 (Mg++)$, com $r^2 = 0,4553$. Segundo BAVER et al. (1972), os agregados do solo no estado friável se mantêm unidos, pelo menos em parte, pela orientação das moléculas de água entre as partículas individuais e os cátions trocáveis. É possível, portanto, que no sistema de enlaces formado por moléculas de água orientadas até os cátions trocáveis, unidos à moléculas de água orientadas até as partículas, o magnésio tenha sido o mais importante deles. Também foi observado uma boa correlação entre esse elemento com a densidade do solo, através da relação $DSFMIN = 1,01335 + 0,0514599 (Mg++)$, com $r^2 = 0,4109$, além da relação com o carbono, mostrada no quadro 5, mas com o coeficiente angular negativo.

Desde que as interações entre os componentes da fração argila de um solo são refletidas pela razão de atividade (MITCHELL, 1976), a contribuição da matéria orgânica fica bem evidenciada pela relação $IP/ARG = 0,19807 + 0,034341 (\%C)$, com $r^2=0,4356$ (quadro 5). Essa relação mostra que quando a

porcentagem de carbono é nula, a contribuição da fração mineral na razão de atividade é 0,198, que deve ser interpretada como valor médio da camada de 0 a 30cm dos latossolos neste estudo, quando isentos de matéria orgânica. O quadro 4 mostra que os valores extremos de IP/ARG foram 0,189 e 0,367, com valor médio de 0,264. Para alguns oxissóis do Havai e Porto Rico, nos primeiros 25cm de profundidade, EL-SWAIFY (1980) mostra, através de dados fornecidos por diversos autores, que as razões de atividade variaram entre 0,20 a 0,34. Valores de 0,16 e 0,37 também foram encontrados, mas as profundidades nas quais esses valores foram obtidos não são disponíveis.

Um solo é considerado conter argila "inativa", "normal" e "ativa", quando sua razão de atividade é $<0,75$; $0,75-1,25$; e $>1,25$, respectivamente (EL SWAIFY, 1980). Como mostra o quadro 4, todos os solos classificam-se dentro da classe das argilas inativas.

KAWANO e HOLNES (1958), mostraram que enquanto os limites de plasticidade dos solos dominados por caulinita foram aproximadamente iguais àqueles solos dominados por montmorilonita, os limites de liquidez dos cauliníticos (e portanto os índices de plasticidade), foram consideravelmente menores. Os baixos limites de liquidez nos oxissolos podem ser atribuídos, segundo EL-SWAIFY e HENDERSON (1967), à grande restrição na tendência à expansão das caulinitas. Esta tendência torna-se sempre mais suprimida na presença de sesquióxidos (EL-

SWAIFY e EMERSON, 1975).

Os baixos valores de índice de plasticidade dos latossolos estão evidenciados na figura 15, a qual mostra que os índices IP localizam-se abaixo da linha-A, estabelecida por Casagrande e definida pela equação $IP = 0,73 (LL - 20)$, conforme MITCHELL (1976). A linha-A separa os siltes inorgânicos, argilas e siltes orgânicos (abaixo da linha) das argilas inorgânicas (acima). Além da equação de regressão para os valores de IP x LL dos latossolos utilizados neste trabalho (quadro 5), são apresentadas outras duas obtidas por SATO, citado por EL-SWAIFY (1980), para oxissolos havaianos: uma para solos de composição predominantemente caulinítica, e a outra para solos de composição predominantemente oxídica. Respectivamente, essas duas últimas equações são, segundo SATO citado por EL-SWAIFY (1980), $IP = -0,25 + 0,39 (LL)$ e $IP = -3,49 + 0,39 (LL)$. Como se observa, o coeficiente angular para os latossolos é praticamente igual aos dos oxissóis havaianos, sendo que o seu coeficiente linear sugere uma composição mineralógica predominantemente caulinítica, o que confirma os estudos de SANTOS FILHO (1977); FASOLO e COSTA LIMA (1978).

É interessante observar que nenhuma correlação importante nos limites e índices de consistência envolvendo a porcentagem de argila foi observada. As porcentagens de areia e silte, por outro lado, só apresentaram algum significado na

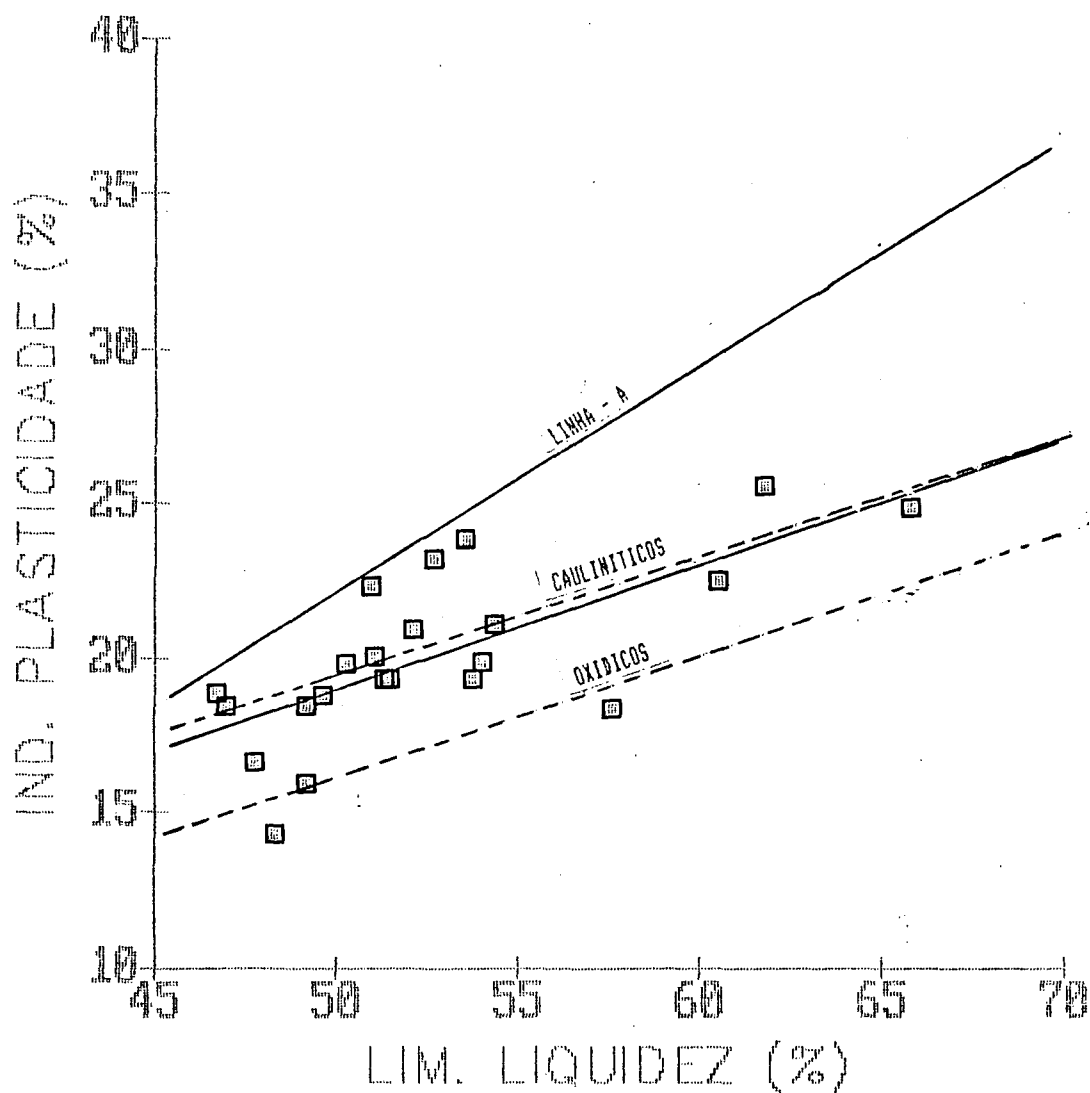


Figura 15. Relação entre o índice de plasticidade e o limite de liquidez. A linha "A" representa a divisão de Casagrande entre argilas inorgânicas (acima da linha) e argilas orgânicas (abaixo). As linhas pontilhadas referem-se aos solos havaianos de natureza predominantemente caulinitica ou oxídica, obtidos por SATO, citado por EL-SWAIFY (1980). Os pontos experimentais e a linha cheia referem-se ao LATOSSOLO ROXO do Estado do Paraná.

DSFMAX e FMAX, respectivamente. Foi observado, também, um coeficiente de determinação muito baixo para a relação entre CTC e argila, inclusive com coeficiente angular negativo. A CTC melhor se correlacionou com o silte do que com a argila, e significativamente com o carbono. As mesmas constatações se verificaram quando se analisaram essas correlações lineares a partir dos dados fornecidos por EMBRAPA (1984), considerando os valores de argila, silte, carbono e CTC dos primeiros 30 cm de todos os perfis de latossolo roxo.

Como uma consequência da alta densidade de cargas negativas das substâncias húmicas, a matéria orgânica contribui substancialmente na CTC (VAN DIJK, 1971; ALLISON, 1973). Isso é especialmente verdadeiro para os horizontes superficiais dos latossolos (KINJO, 1967; VAN RAIJ, 1967). Embora sua contribuição seja dependente do pH (BACHE, 1979; KINJO, 1967; VAN RAIJ, 1967), é difícil ter acesso à precisa extensão dos seus efeitos devido à íntima associação entre o húmus e os constituintes inorgânicos do solo (TATE e THENG, 1980). VAN RAIJ (1967), por exemplo, verificou que em 22 perfis de solos do Estado de São Paulo, a matéria orgânica contribuiu com 71% na CTC das amostras superficiais. Os argumentos desses autores parecem fortes e suficientes para mostrar as limitações das correlações simples do tipo $Y=A+BX$, na interpretação de determinados fenômenos, particularmente para os latossolos roxo, onde os coeficientes de determinação, apesar de significativos, são na maioria deles

baixos (quadro 5). Para contornar esse problema, na prática, TATE e THENG (1980) sugerem duas alternativas: (i) pela remoção seletiva dos componentes orgânicos dos minerais do solo, e (ii) por procedimentos estatísticos, tal como a análise de regressão múltipla. Segundo ZAR (1974), existem vários procedimentos de regressão múltipla que permitem concluir quais das variáveis tem significativo efeito na variável dependente, como o procedimento "stepwise", por exemplo.

A regressão "stepwise" foi aplicada em todos os limites e índices de consistência, bem como nos valores de DSFMAX, DSFMIN, e IP/ARG, todos em função das porcentagens de carbono, argila, silte e areia dos solos considerados. Em todos os casos, com exceção de DSFMAX e DSFMIN, a areia e o silte foram sempre rejeitados na regressão por não apresentarem significância. Os resultados são mostrados no quadro 6.

A indicação quantitativa dos efeitos da argila e da matéria orgânica nos limites e índices de consistência, pode agora ser analisada pelo confronto das constantes da equação de regressão de "stepwise", já que as duas variáveis promoveram, combinadamente, significativo ajuste com todos os limites e índices, e com altos coeficientes de determinação.

As constantes do quadro 6 mostram que é necessária uma variação percentual de argila 12,57 vezes maior do que a variação na porcentagem de carbono para que eles produzam o mesmo efeito

na FMAX. Para a FMIN e IF, essas variações são 9,56 e 16,88,

Quadro 6. Regressão "stepwise" entre os valores FMIN, FMAX, IF, LP, LL, DSFMAX, DSFMIN e IP/ARG com as porcentagens de carbono, argila, silte e areia das camadas de 0 a 15 e 15 a 30cm de onze unidades taxonômicas da classe LATOSSOLO ROXO (modelo $Y = AX_1 + BX_2 + CX_3 + DX_4$, onde X_1 , X_2 , X_3 e X_4 representam, respectivamente, as porcentagens de carbono, argila, silte e areia; A, B, C e D são constantes e Y é a variável dependente).

Variável dependente	A	B	C	D	r2 ajustado	erro padrão da estimativa
FMIN	1,816	0,190	-	-	0,985***	2,288
FMAX	4,061	0,323	-	-	0,995***	2,430
IF	2,245	0,133	-	-	0,975***	2,382
LP	4,337	0,323	-	-	0,996***	2,137
LL	6,702	0,526	-	-	0,998***	2,449
IP	2,365	0,202	-	-	0,986***	2,414
DSFMAX	0,013	0,006	0,005	0,011	0,999***	0,018
DSFMIN	-0,041	0,011	0,012	0,014	0,999***	0,042
IP/ARG	0,044	0,002	-	-	0,982***	0,036

*** significativo ao nível de 0,1%

respectivamente. Esses valores evidenciam a importância da matéria orgânica, comparativamente à argila, na definição desses limites, particularmente no IF porque, independentemente da porcentagem de argila, os valores de IF podem ser aumentados em várias unidades percentuais com o aumento da matéria orgânica do solo. Esta observação é de grande interesse prático, porquanto o IF representa o intervalo de umidade ótima para se produzir uma estrutura desejável aos solos (LIMA, 1970; BAVER et al. 1972), com a produção de agregados distintos daqueles extremos amassados como plástico ou daqueles finamente pulverizados (COLLIS-GEORGE

et al., 1971). Com isso, o tempo de espera para dar início às atividades de preparo mecânico num solo rico em matéria orgânica, pode ser substancialmente reduzido após a ocorrência de chuva ou irrigação.

Também deve ser observado pelas constantes do quadro 6, que o carbono teve um maior efeito no IF do que na FMIN, na ordem de 1,24 vezes, o que significa que para a FMAX esse efeito foi de 2,24 vezes maior do que nos valores da FMIN. Para a argila, por outro lado, o seu efeito no IF foi cerca de 70% daquele produzido na FMIN, significando que na FMAX esse efeito foi 1,70 vezes maior do que nos valores da FMIN. Isso equivale a dizer que as quantidades de água necessárias pela matéria orgânica e argila, para que esses solos atinjam a condição de FMAX, são 2,24 e 1,70 vezes maior daquelas para atingir a FMIN, respectivamente. Consequentemente, o estado de sãção desses solos aumenta na proporção de 1,24 e 0,70 para cada unidade de água requerida respectivamente pela matéria orgânica e argila no valor da FMIN. Esta situação se traduz, mais uma vez, favoravelmente à importância do aumento da matéria orgânica do solo, porque embora ela também resulte num efeito positivo no aumento da FMIN, seu efeito maior é no aumento da FMAX, com conseqüente aumento no intervalo de friabilidade, o que é desejável do ponto de vista agronômico.

Quanto aos limites e índices de plasticidade, verifica-se que os efeitos tanto da matéria orgânica como da

argila no intervalo de consistência plástica, são aproximadamente a metade daqueles que elas produzem no início desse estado ($IP/LP=0,55$ para o carbono e $0,63$ para a argila). Consequentemente, o LL desses solos aumenta na proporção de $1,55$ e $1,63$ para cada unidade de água requerida respectivamente pela matéria orgânica e argila no valor de LP.

Os efeitos quantitativos das frações orgânica e mineral nos estados de consistência friável e plástica, são facilmente verificados quando se relacionam os valores de IP/IF de cada respectiva fração. Esses valores resultam em $1,053$ para a fração orgânica e $1,52$ para a mineral. Diante disso, se conclui que a matéria orgânica tem o mesmo efeito nos dois estados, enquanto que a argila é $1,52$ vezes mais efetiva no estabelecimento do estado plástico do que no friável.

Na definição dos valores de densidade do solo nos pontos de friabilidade mínima e máxima, o quadro 6 sugere que das frações minerais, a areia teve um comportamento idêntico nesses limites extremos de friabilidade. Por outro lado, a redução dos coeficientes da argila e do silte, quase em iguais proporções (quadro 6), na friabilidade máxima, fazem supor que essas frações participem ativamente no processo de agregação nesses solos a partir do início do estado friável, reduzindo suas densidades. Os diferentes sinais dos coeficientes do carbono para as densidades, mostram que seus efeitos foram distintos em cada caso, isto é, um

aumento na densidade no ponto de friabilidade máxima e um decréscimo na de mínima. Isso se explica pelo fato de que as densidades foram obtidas com base nas massas úmidas de solo e nessa condição a capacidade de retenção de água pela fração orgânica é alta. Contudo, as magnitudes dos coeficientes dessa fração mostram que a capacidade da matéria orgânica em aumentar a densidade úmida na FMAX foi 3,2 vezes menor do que a sua capacidade em decrescê-la na FMIN.

A última regressão do quadro 6, finalmente, mostra que é necessária uma variação percentual de argila 22 vezes maior do que a de carbono para que ambas produzam um igual efeito na razão de atividade. Apesar da importância que a razão de atividade desempenha na engenharia de solos, a observação anterior mostra que devem ser tomados cuidados especiais na interpretação desses valores pelos efeitos da matéria orgânica. Do ponto de vista agrônomo, por outro lado, a razão de atividade não parece encerrar algum significado importante.

5 CONCLUSÕES

De acordo com os objetivos deste trabalho e do que foi discutido no item 4, pode-se concluir:

- 1) O estado médio de consistência friável dos latossolos estudados foi relativamente pequeno (20%), diante da magnitude ocupada pelo conjunto dos demais estados (seco, plástico e fluído), que foi de 80%.
- 2) A presença de um mínimo nas curvas densidade versus umidade, confirmadas em todas as camadas dos solos estudados, demonstra que uma importante variação no estado físico do solo ocorre neste ponto, e os testes estatísticos revelaram que tanto a FMAX como o LP foram capazes de identificar esse ponto de mudança entre o estado friável e plástico, indistintamente.
- 3) A correlação entre os valores de IP e LL mostrou um coeficiente angular para os latossolos estudados praticamente igual aos dos oxissóis havaianos, e um coeficiente linear que sugere uma composição mineralógica predominantemente caulinítica.
- 4) Dos efeitos quantitativos das frações orgânica e mineral, a primeira se mostrou importante em todos os limites e índices de consistência; da segunda, somente a argila. A matéria orgânica apresentou igual efeito em ambos os estados friável e plástico, enquanto a argila foi 1,52 vezes mais efetiva no estabelecimento

do estado plástico do que no friável.

5) Adicionalmente às porcentagens de carbono e argila, as porcentagens de silte e areia também se mostraram importantes na definição dos valores de máxima e mínima densidades do solo úmido.

5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

01. ALISSON, F.E. Soil organic matter and its role in crop production. Amsterdam : Elsevier, 1973. 637 p.
02. ATTERBERG, A. Die Plastizität der Tone. Int. Mitt. Bodenk., v. 1, p. 10-43, 1911
03. ATTERBERG, A. Die Konsistenz und die Bindigkeit der Boden. Int. Mitt. Bodenk., v. 2, p. 149-189, 1912
04. BAVER, L.D.; GARDNER, W.H.; GARDNER, W.H. Soil physics. 4.ed. New York : J. Wiley, 1972. 498 p.
05. BODMAN, G.B. Methods of measuring soil consistency. Soil Science, Baltimore, v. 68, p. 37-56, 1949.
06. CAMPBELL, D.J.; STAFFORD, J.V.; BLACKWELL, P.S. The plastic limit, as determined by the drop-cone test, in relation to the mechanical behavior of soil. The Journal of Soil Science, Oxford, v. 31, p. 11-24, 1980
07. CAMPBELL, D.J. Liquid limit determination of available topsoils using a drop-cone penetrometer. Journal Soil Science, Oxford, v. 26, p. 234-240, 1975
08. CAMPBELL, D.J. Plastic limit determination using a drop-cone penetrometer. The Journal of Soil Science, Oxford, v. 27, p. 295-300, 1976
09. CASAGRANDE, A. Research on the Atterberg limits of soils. Public Roads, Washington, v. 13, p. 121-130, 1932
10. CHRISTENSEN, O. An index of friability of soils. Soil Science, Baltimore, v. 29, p. 119-135, 1930
11. COLLIS-GEORGE, N.; DAVEY, B.G.; SMILES, D.E.

- Suelo, atmosfera y fertilizantes: fundamentos da agricultura moderna-1. Barcelona : Aedos, 1971. 334 p.
12. EL-SWAIFY, S.A. Physical and mechanical properties of oxisols. In : THENG, B.K.G., ed. Soil with variable charge. New Zealand : New Zealand Society of Soil Science, 1980. p. 303-323
 13. EL-SWAIFY, S.A.; EMERSON, W.W. Changes in the physical properties of soil clays due to precipitated aluminium and iron hydroxides. I. Swelling and aggregate stability after drying. Soil Science Society American Proceedings, Madison, v. 39, p. 1056-1063, 1975
 14. EL-SWAIFY, S.A.; HENDERSON, D.W. Water retention by osmotic swelling of certain colloidal clays with varying ionic composition. Journal of Soil Science, Oxford, v.18, p. 223-232, 1967
 15. EMBRAPA. Manual de métodos de análise de solo. Rio de Janeiro : EMBRAPA-SNLCS, 597 p. 1979
 16. EMBRAPA. Levantamento de reconhecimento dos solos do Estado do Paraná. Curitiba : EMBRAPA-SNLCS/SUDESUL/IAPAR, (Boletim Técnico, 27 1984. 414 p.
 17. FASOLO, P.J. Mineralogical identification of four igneous extrusive rock derived oxisols from the State of Paraná, Brasil. Lafayette : Purdue University, 1978. 109 f. Tese (Mestrado em Agronomia) - Purdue University
 18. JAMISON, V.C. The effect of some soil conditioners on friability and compactibility. Proceedings Soil Science Society of America, Madison, v. 18, p. 391-394, 1954
 19. KAWANO, Y.; HOLMES, W.E. Compaction tests as a means of soil structure evaluation. Soil Science Society America Proceedings, Madison, v. 22, p. 369-372, 1958
 20. KIEHL, E.J.; CESAR, C.M. Determinação da umidade ótima de agregação e da friabilidade máxima. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO (9. : 1963 : Fortaleza). Anais. Fortaleza : 1963

21. KIEHL, E.J. Manual de Edafologia - Relação solo-planta. São Paulo : Ed. Agronômica Ceres, 1979. 262 p.
22. KINJO, T. Capacidade de troca de cátions em relação ao pH do solo. Piracicaba : Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", 1967. 98 f. Tese (Mestrado em Agronomia) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz"
23. LIMA, F.A.M. Consistência do solo - friabilidade de três séries de solos do Município de Piracicaba. Piracicaba : Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", 1970. 77 f. Tese (Mestrado em Agronomia) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz"
24. LIMA, V.C. Evolução mineralógica de solos derivados de rochas eruptivas básicas no terceiro planalto do Estado do Paraná. 1978. (não publicada)
25. MICHELL, J.K. Fundamentals of soil behavior. New York : J. Wiley, 1976. 422 p.
26. PAYNE, P.C. The relationship between the mechanical properties of soil and the performance of sample cultivation implements. Journal of Agricultural Engineering Research, London, v. 1, 23-50, 1956
27. REVUT, I.B.; RODE, A.A. Experimental methods of studying soil structure (translated from Russian). New Delhi : Amerind, 1981. 526 p.
28. RUSSEL, E.W. The interaction of clay with water and organic liquids as measured by specific volume changes and its relation to the phenomena of crumb formation in soils. Phil. Trans. Roy. Soc. London, v. 233A, 361-389, 1934
29. SANTOS FILHO, A. Gênese und Eigenschaften repräsentativer Bodentypen in der Schichtstufenlandschaft des Staates Paraná, Brasilien. Freiburg, 1977. 200 p. Dissertation (Doktorwurde der Forstwissenschaftlichen) - Fakultät der Albert-Ludwigs-Universität zu

Freiburg im Breisgau.

30. SHERWOOD, P.T.; RYLEY, M.D. An investigation of a cone-penetrometer method for the determination of the liquid limit. Geotechnique, London, v. 20, p. 203-208, 1970.
31. TATE, K.R.; THENG, B.K.G. Organic matter and its interactions with inorganic soil constituents. In: THENG, B.K.G., ed. Soils with variable charge. New Zealand : New Zealand Society of Soil Science, 1980. p. 225-249
32. TOWNER, G.D. An examination of the fall-cone method for the determination of some strength properties of remoulded agricultural soils. Journal of Soil Science, Oxford, v. 24, p. 470-479, 1973
33. UTOMO, W.K.; DEXTER, A.R. Soil friability. Journal of Soil Science, Oxford, v. 32, p. 203-213, 1981
34. VAN DIJK, H. Colloid chemical properties of humic matter. In: McLaren, A.D.; KUJINS, J.S., ed. Soil biochemistry. New York : M. Dkker, 1971. v. 2, p. 16-35
35. VAN RAIJ, B. A capacidade de troca de cátions das frações orgânica e mineral em solos. Piracicaba: Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", 1967. 87 f. Tese (Doutorado em Agronomia) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz"
36. ZAR, J.H. Biostatistical analysis. Englewood Cliffs : Prentice Hall, 1974. 620 p.

ANEXO I

Valores experimentais da densidade úmida e umidade gravimétrica das camadas de 0 a 15 e 15 a 30cm de onze unidades taxonômicas da classe do LATOSSOLOS ROXO do Estado do Paraná.

SOLO: JUR
CAMADA: 0 a 15cm

74

Obs	Umidade (g/g)	Densidade
1	0.0645	0.976
2	0.0678	1.005
3	0.1177	1.030
4	0.1231	1.056
5	0.1607	1.070
6	0.1698	1.094
7	0.1915	1.090
8	0.2203	1.072
9	0.2264	0.955
10	0.2308	0.823
11	0.2373	0.747
12	0.2778	0.694
13	0.2969	0.652
14	0.3148	0.644
15	0.3175	0.651
16	0.3402	0.684
17	0.3478	0.714

SOLO: JUR
CAMADA: 15 a 30cm

Obs	Umidade (g/g)	Densidade
1	0.0357	0.983
2	0.0725	0.964
3	0.0755	0.973
4	0.1148	1.007
5	0.1143	1.028
6	0.1250	1.050
7	0.1668	1.071
8	0.1923	1.069
9	0.2188	1.081
10	0.2400	1.007
11	0.2394	0.812
12	0.2500	0.713
13	0.2745	0.654
14	0.2931	0.625
15	0.3051	0.636
16	0.3143	0.669

SOLO: FOI
CAMADA: 0 A 15cm

75

Obs	Umidade (g/g)	Densidade
1	0.0526	0.983
2	0.0755	1.016
3	0.0806	1.036
4	0.1087	1.055
5	0.1154	1.072
6	0.1429	1.087
7	0.1556	1.103
8	0.1754	1.112
9	0.1961	1.056
10	0.2364	0.854
11	0.2453	0.711
12	0.2553	0.641
13	0.2750	0.630
14	0.2821	0.631
15	0.3000	0.630
16	0.3167	0.660
17	0.3333	0.678

SOLO: FOI
CAMADA: 15 a 30 cm

Obs	Umidade (g/g)	Densidade
1	0.0377	0.954
2	0.0577	0.973
3	0.0714	0.986
4	0.0943	1.018
5	0.1000	1.026
6	0.1277	1.046
7	0.1458	1.066
8	0.1739	1.062
9	0.1818	1.091
10	0.2308	0.930
11	0.2407	0.808
12	0.2449	0.727
13	0.2600	0.690
14	0.2683	0.660
15	0.2969	0.632
16	0.3091	0.622
17	0.3208	0.620
18	0.3265	0.610
19	0.3333	0.628
20	0.3478	0.632
21	0.3478	0.632
22	0.3492	0.639

SOLO: LAR
CAMADA: 0 a 15cm

76

Obs	Umidade (g/g)	Densidade
1	0.0784	0.888
2	0.0961	0.902
3	0.1035	0.927
4	0.1552	0.951
5	0.1636	0.979
6	0.2064	0.999
7	0.2188	1.001
8	0.2333	0.977
9	0.2742	0.898
10	0.2909	0.753
11	0.3061	0.709
12	0.3509	0.691
13	0.3793	0.657
14	0.3969	0.631
15	0.4186	0.622
16	0.4462	0.650
17	0.4474	0.674
18	0.4576	0.715

SOLO: LAR
CAMADA: 15 a 30cm

Obs	Umidade (g/g)	Densidade
1	0.0909	0.871
2	0.1136	0.890
3	0.1395	0.910
4	0.1489	0.934
5	0.1698	0.935
6	0.2000	0.954
7	0.2000	0.969
8	0.2391	0.981
9	0.2453	0.973
10	0.2881	0.817
11	0.2983	0.754
12	0.3200	0.705
13	0.3409	0.681
14	0.3529	0.671
15	0.3864	0.646
16	0.3878	0.607
17	0.4000	0.629
18	0.4286	0.645

SOLO: LCE
CAMADA: 0 a 15cm

77

Obs	Umidade (g/g)	Densidade
1	0.0426	1.030
2	0.0517	1.061
3	0.0877	1.096
4	0.1020	1.109
5	0.1395	1.126
6	0.1613	1.144
7	0.1778	1.139
8	0.2000	1.117
9	0.2069	0.976
10	0.2353	0.823
11	0.2623	0.723
12	0.2667	0.697
13	0.2766	0.648
14	0.2895	0.617
15	0.3158	0.633
16	0.3333	0.642
17	0.3333	0.669

SOLO: LCE
CAMADA: 15 a 30cm

Obs	Umidade (g/g)	Densidade
1	0.0263	1.005
2	0.0313	1.004
3	0.0638	1.061
4	0.0889	1.078
5	0.0909	1.090
6	0.1094	1.112
7	0.1379	1.115
8	0.1579	1.141
9	0.1795	1.146
10	0.1944	1.128
11	0.2292	1.113
12	0.2364	0.989
13	0.2500	0.842
14	0.2500	0.786
15	0.2857	0.674
16	0.2941	0.640
17	0.2973	0.626
18	0.3095	0.614
19	0.3571	0.614
20	0.3636	0.622

SOLO: LIE
CAMADA: 0 a 15cm

78

Obs	Umidade (g/g)	Densidade
1	0.0448	0.985
2	0.0606	1.003
3	0.0746	1.037
4	0.1000	1.048
5	0.1212	1.065
6	0.1389	1.084
7	0.1500	1.081
8	0.1695	1.080
9	0.2069	1.028
10	0.2222	0.838
11	0.2456	0.695
12	0.2549	0.648
13	0.2656	0.605
14	0.2941	0.595
15	0.2979	0.607
16	0.3091	0.650

SOLO: LIE
CAMADA: 15 a 30cm

Obs	Umidade (g/g)	Densidade
1	0.0170	0.937
2	0.0435	0.975
3	0.0635	0.999
4	0.0727	1.018
5	0.1000	1.036
6	0.1177	1.046
7	0.1450	1.068
8	0.1639	1.077
9	0.1765	1.086
10	0.1957	1.050
11	0.2281	0.877
12	0.2540	0.679
13	0.2702	0.629
14	0.2800	0.615
15	0.2941	0.610
16	0.3261	0.612
17	0.3333	0.639

SOLO: LIM
CAMADA: 0 a 15cm

79

Obs	Umidade (g/g)	Densidade
1	0.0429	0.955
2	0.0615	1.001
3	0.0667	1.040
4	0.0674	1.071
5	0.0796	1.080
6	0.1484	1.096
7	0.2027	1.109
8	0.2200	1.042
9	0.2264	0.925
10	0.2500	0.788
11	0.2895	0.716
12	0.3077	0.591
13	0.3125	0.598
14	0.3158	0.597
15	0.3269	0.618
16	0.3333	0.648

SOLO: LIM
CAMADA: 15 a 30cm

Obs	Umidade (g/g)	Densidade
1	0.0377	0.954
2	0.0577	0.973
3	0.0714	0.986
4	0.0943	1.018
5	0.1000	1.026
6	0.1277	1.046
7	0.1458	1.066
8	0.1739	1.062
9	0.1818	1.091
10	0.2128	1.083
11	0.2200	1.058
12	0.2308	0.930
13	0.2407	0.808
14	0.2449	0.727
15	0.2600	0.690
16	0.2683	0.660
17	0.2969	0.632
18	0.3091	0.622
19	0.3208	0.620
20	0.3265	0.610
21	0.3333	0.628
22	0.3478	0.632
23	0.3492	0.639

SOLO: CMO
CAMADA: 0 a 15cm

80

Obs	Umidade (g/g)	Densidade
1	0.0566	1.014
2	0.0755	1.030
3	0.1091	1.070
4	0.1270	1.082
5	0.1452	1.129
6	0.1731	1.129
7	0.2076	1.105
8	0.2295	0.866
9	0.2500	0.775
10	0.2742	0.690
11	0.3014	0.671
12	0.3026	0.685
13	0.3036	0.698
14	0.3417	0.705

SOLO: CMO
CAMADA: 15 a 30cm

Obs	Umidade (g/g)	Densidade
1	0.0755	0.997
2	0.0946	1.006
3	0.1111	1.044
4	0.1342	1.063
5	0.1493	1.074
6	0.1781	1.088
7	0.1867	1.090
8	0.2174	1.061
9	0.2414	0.917
10	0.2714	0.760
11	0.2763	0.673
12	0.3014	0.631
13	0.3194	0.636
14	0.3333	0.670

SOLO: MAR
CANADA: 0 a 15cm

81

Obs	Umidade (g/g)	Densidade
1	0.0508	1.004
2	0.0645	1.011
3	0.0781	1.022
4	0.0986	1.050
5	0.1111	1.052
6	0.1429	1.066
7	0.1600	1.060
8	0.1846	1.002
9	0.2154	0.890
10	0.2308	0.794
11	0.2742	0.673
12	0.2830	0.642
13	0.2877	0.654
14	0.3188	0.681

SOLO: MAR
CANADA: 15 a 30cm

Obs	Umidade (g/g)	Densidade
1	0.0408	0.946
2	0.0727	0.983
3	0.0893	1.019
4	0.1167	1.029
5	0.1429	1.046
6	0.1774	1.049
7	0.1846	1.076
8	0.2037	1.041
9	0.2373	0.950
10	0.2407	0.841
11	0.2593	0.752
12	0.3125	0.683
13	0.3148	0.643
14	0.3256	0.649
15	0.3585	0.659
16	0.3542	0.666
17	0.3833	0.720?.op

SOLO: TOL
CAMADA: 0 a 15cm

82

Obs	Umidade (g/g)	Densidade
1	0.0536	0.940
2	0.0750	0.954
3	0.1053	0.990
4	0.1177	1.005
5	0.1163	1.034
6	0.1463	1.051
7	0.1786	1.052
8	0.1818	1.036
9	0.2222	0.934
10	0.2364	0.787
11	0.2432	0.712
12	0.2632	0.660
13	0.2791	0.631
14	0.2979	0.603
15	0.3243	0.592
16	0.3192	0.601
17	0.3158	0.605
18	0.3333	0.607
19	0.3417	0.646

SOLO: TOL
CAMADA: 15 a 30cm

Obs	Umidade (g/g)	Densidade
1	0.0630	0.937
2	0.0588	0.954
3	0.0816	0.988
4	0.1191	1.016
5	0.1220	1.037
6	0.1698	1.048
7	0.1818	1.059
8	0.1915	1.044
9	0.1951	0.941
10	0.2171	0.764
11	0.2391	0.688
12	0.2708	0.653
13	0.2778	0.643
14	0.2800	0.637
15	0.2857	0.599
16	0.3200	0.609
17	0.2979	0.589
18	0.2927	0.597
19	0.3250	0.603
20	0.3571	0.598
21	0.3462	0.606
22	0.3750	0.660

SOLO: CAM
CAMADA: 0 a 15cm

83

Obs	Umidade (g/g)	Densidade
1	0.0417	0.889
2	0.0909	0.914
3	0.1111	0.927
4	0.1132	0.944
5	0.1633	0.985
6	0.1818	0.996
7	0.2093	0.985
8	0.2200	0.929
9	0.2407	0.850
10	0.2857	0.776
11	0.3044	0.725
12	0.3065	0.710
13	0.3148	0.659
14	0.3250	0.648
15	0.3333	0.642
16	0.3684	0.631
17	0.3973	0.644
18	0.4321	0.732

SOLO: CAM
CAMADA: 15 a 30cm

Obs	Umidade (g/g)	Densidade
1	0.0658	0.917
2	0.0862	0.942
3	0.1053	0.959
4	0.1400	0.996
5	0.1482	1.008
6	0.2037	1.027
7	0.2182	1.039
8	0.2340	1.036
9	0.2698	0.827
10	0.3091	0.720
11	0.3333	0.688
12	0.3519	0.668
13	0.3659	0.634
14	0.3721	0.625
15	0.4035	0.699
16	0.4035	0.699

SOLO: UBI
CAMADA: 0 a 15cm

84

Obs	Umidade (g/g)	Densidade
1	0.0714	0.841
2	0.0790	0.870
3	0.0816	0.917
4	0.1042	0.952
5	0.1277	0.985
6	0.1429	0.993
7	0.1803	1.004
8	0.2321	0.841
9	0.2537	0.765
10	0.2692	0.718
11	0.3143	0.701
12	0.3288	0.638
13	0.3390	0.623
14	0.3774	0.713

SOLO: UBI
CAMADA: 15 a 30cm

Obs	Umidade (g/g)	Densidade
1	0.0385	0.892
2	0.0484	0.921
3	0.0727	0.947
4	0.1091	0.963
5	0.1186	0.996
6	0.1515	1.012
7	0.1525	1.084
8	0.1818	1.047
9	0.2167	1.063
10	0.2241	1.026
11	0.2394	0.840
12	0.2593	0.761
13	0.2698	0.700
14	0.3000	0.674
15	0.3023	0.646
16	0.3148	0.639
17	0.3233	0.651
18	0.3415	0.669
19	0.3529	0.697

ANEXO II

Testes estatísticos de (i) igualdade entre as variâncias e (ii) comparação de médias de de dados pareados entre a friabilidade máxima obtida segundo LIMA (1970) e o limite de plasticidade determinado segundo CASAGRANDE (1932).

Two-Sample Analysis Results

	LP	FMAX	Pooled
Sample Statistics: Number of Obs.	22	22	44
Average	32.8182	32.3364	32.5773
Variance	12.1835	9.96433	11.0739
Std. Deviation	3.49048	3.15663	3.32775
Median	31.8	31.25	31.35

Difference between Means = 0.481818

Conf. Interval For Diff. in Means: 95 Percent
 (Equal Vars.) Sample 1 - Sample 2 -1.5435 2.50713 42 D.F.
 (Unequal Vars.) Sample 1 - Sample 2 -1.5441 2.50774 41.6 D.F.

Ratio of Variances = 1.22271

Conf. Interval for Ratio of Variances: 0 Percent
 Sample 1 ÷ Sample 2

Hypothesis Test for H0: Diff = 0 Computed t statistic = 0.480208
 vs Alt: NE Sig. Level = 0.633571
 at Alpha = 0.05 so do not reject H0.

HYPOTHESIS TESTS FOR MEANS

DIFFERENCE BETWEEN MEANS: PAIRED OBSERVATIONS

HEADER DATA FOR: D:DADOSTES

NUMBER OF CASES: 22 NUMBER OF VARIABLES: 27

HYPOTHESIZED DIFF. = .0000
 MEAN = .4818
 STD. DEV. = 1.3872
 STD. ERROR = .2958
 N = 22 (CASES = 1 TO 22)

T = 1.6291 (D.F. = 21) GROUP 1: LP
 GROUP 2: FMAX

PROB. = .0591

PRESS ANY KEY TO CONTINUE.